



TUGAS AKHIR - MO 184804

ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION*
PADA PIPA BAWAH LAUT SAAT KONDISI OPERASI
STUDI KASUS: *EXPORT PIPELINE 14" JALUR CENTRAL PROCESSING*
PLATFORM - ONSHORE RECEIVING FACILITY, PERTAMINA HULU
ENERGI WEST MADURA OFFSHORE

AHMAD SYAHRONI
NRP. 04311540000077

Dosen Pembimbing :
Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



FINAL PROJECT - MO 184804

**FATIGUE ANALYSIS DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION ON SUBSEA
PIPELINE DURING OPERATION CONDITION
CASE STUDY : EXPORT PIPELINE 14" CENTRAL PROCESSING
PLATFORM - ONSHORE RECEIVING FACILITY, PERTAMINA HULU
ENERGI WEST MADURA OFFSHORE**

**AHMAD SYAHRONI
NRP. 04311540000077**

Supervisors :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

**DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**

ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION* PADA PIPA BAWAH LAUT SAAT KONDISI OPERASI
STUDI KASUS: *EXPORT PIPELINE 14" CENTRAL PROCESSING PLATFORM – ONSHORE RECEIVING FACILITY, PERTAMINA HULU ENERGI WEST MADURA OFFSHORE.*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi
Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

AHMAD SYAHRONI

NRP. 04311540000077

Disetujui oleh:

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

(Pembimbing 1)

2. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

(Pembimbing 2)

3. Dr. Ir. Handayanu, M.Sc.

(Penguji 1)



Handwritten signature

SURABAYA, JANUARI 2019

**ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION*
PADA PIPA BAWAH LAUT SAAT KONDISI OPERASI**

**STUDI KASUS: *EXPORT PIPELINE 14" CENTRAL PROCESSING PLATFORM*
– *ONSHORE RECEIVING FACILITY*, PERTAMINA HULU ENERGI WEST
MADURA OFFSHORE**

Nama : Ahmad Syahroni
NRP : 04311540000077
Departemen : Teknik Kelautan FTK – ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Free span merupakan suatu kondisi yang dialami oleh *subsea pipeline* dimana terdapat bentangan karena ketiadaan *support* dari tanah. *Free span* terjadi akibat adanya perubahan kondisi topografi dasar laut dan penggerusan akibat arus yang berada pada dasar laut. Kondisi ini dapat menyebabkan pipa mengalami getaran karena pengaruh dinamis oleh arus. Arus yang mengenai pipa akan mengakibatkan adanya aliran *vortex* pada belakang sisi pipa. *Vortex Induced Vibration* (VIV) merupakan fenomena yang terjadi pada komponen yang berbentuk silindris yang disebabkan oleh arus laut, menyebabkan terjadinya getaran oleh pergerakan fluida yang mengenai pipa sehingga menimbulkan getaran pada pipa. Analisis dinamis dilakukan pada *free span* yang mengalami VIV untuk mengetahui keadaan pipa dalam kondisi beroperasi yang rentan akan terjadinya kegagalan seperti kelelahan pipa. Tahap pertama yang dilakukan dalam Tugas akhir ini adalah *screening* kriteria statis sesuai DNV GL-RP-F105. Dari *screening* tersebut dihasilkan panjang *free span* maksimal yang diizinkan adalah 12.87 m. Panjang tersebut selanjutnya dilakukan *screening* tahap dua dengan kriteria FLS untuk *fatigue criteria* sesuai DNV-GL RP F105. Setelah mendapatkan panjang bentangan maksimum dilakukan perhitungan *stress range* akibat efek siklis dari arus. *Stress range* yang diperoleh pada tiap bentangan yang ditinjau berkisar pada 20.53 MPa – 191.49 MPa (*in-line*) dan 8.85 MPa – 109.64 MPa (*cross-flow*). Nilai tegangan ekuivalen pada tiap bentangan yang ditinjau adalah 150.27 MPa – 193.37 MPa. Berdasarkan perhitungan *fatigue life* terdapat 3 bentangan yang mengalami kegagalan arah *in-line* dan 1 bentangan mengalami kegagalan arah *cross-flow*. Umur kelelahan pipa secara *in-line* yaitu dengan panjang bentangan 19.15 m, 16.08 m, 15.54 m dengan masing-masing umur kelelahan 7.21 tahun, 7.29 tahun, dan 10.55 tahun. Umur Kelelahan kondisi *cross-flow* yaitu dengan panjang bentangan 19.15 m dengan umur kelelahan 19.74 tahun

Kata Kunci: *Vortex Induced Vibration, Free Span, Subsea Pipeline, In-Line, Cross-Flow, Fatigue Life.*

FATIGUE LIFE ANALYSIS DUE TO VORTEX INDUCED VIBRATION ON SUBSEA PIPELINE DURING OPERATION CONDITION

CASE STUDY: EXPORT PIPELINE 14" CENTRAL PROCESSING PLATFORM – ONSHORE RECEIVING FACILITY, PERTAMINA HULU ENERGI WEST MADURA OFFSHORE

Name : Ahmad Syahroni
NRP : 04311540000077
Department : Ocean Engineering FTK – ITS
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

Abstract— *Free span* is a condition that occurred by subsea pipeline that has a span because there is no support from soil. Free span occurred as a result of topographical modification from the bottom of the sea and scouring as an outcome from current on the seabed. This condition can lead the pipe run into vibration due to the dynamic effect of the stream. The stream that hits the pipe will improve a vortex flow on the back side of the pipe. Vortex Induced Vibration (VIV) is a phenomenon that occurs in cylindrical components caused by ocean stream, causing vibrations by fluid movement that hits the pipe so it is causing vibration in the pipe. The first stage in this final project is screening static criteria according to DNV GL-RP-F105. The screening results maximum free span length that allowed, it is 12.87 m. Then the length carried out to second stage of screening with FLS criteria for fatigue criteria according to DNV-GL RP F105. After obtaining the maximum span length, the stress range calculation carried out due to the cyclic effect of the current. The stress range obtained from each span is around 20.53 MPa - 191.49 MPa (in-line) and 8.85 MPa - 109.64 MPa (cross-flow). The value of the equivalent stress that reviewed in each span is 150.27 MPa - 193.37 MPa. Based on fatigue life calculation, there are 3 spans failed at in-line conditions and 1 span failed at cross flow conditions because of operation condition. The In-line fatigue life of pipe is stretched by span 19.15 m, 16.08 m, and 15.54 m with fatigue life of each span is 7.21 years, 7.29 years, dan 10.55 years. The cross-flow fatigue life of pipe is stretched by span 19.15 m with fatigue life of span is 19.74 years.

Keywords: *Vortex Induced Vibration, Free Span, In-Line, Subsea Pipeline, Cross-Flow, Fatigue Life.*

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT tuhan semesta alam atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan serangkaian kegiatan penelitian dan penulisan laporan Tugas Akhir dengan baik dan tepat waktu. Laporan ini berisi tentang tahapan proses dan hasil dari tugas akhir penulis. Tugas Akhir ini berjudul **“ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *VORTEX INDUCED VIBRATION* PADA PIPA BAWAH LAUT SAAT KONDISI OPERASI. STUDI KASUS *EXPORT PIPELINE 14*” JALUR *CENTRAL PROCESSING PLATFORM – ONSHORE RECEIVING FACILITY*, PERTAMINA HULU ENERGI WEST MADURA OFFSHORE”**

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini mengangkat permasalahan tentang pengaruh *vortex induced vibration* (VIV) terhadap umur kelelahan pipa bawah laut dalam kondisi operasi, guna mengetahui panjang dan gap *span* maksimumnya serta umur kelelahan bentangan pipa tersebut. Penulis menyadari bahwa di dalam proses penyelesaian tugas akhir dan penulisan laporan ini masih terdapat kekurangan, baik dari pemilihan Batasan masalah, pemilihan parameter, dan dari sistematika penulisan. Kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan oleh penulis, agar menjadi evaluasi guna menghasilkan suatu penelitian dan penulisan yang lebih baik ke depannya. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat untuk perkembangan teknologi kemaritiman terutama pada bidang *pipeline* dan dunia minyak dan gas untuk pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, 8 Januari 2018

Ahmad Syahrone

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam bagian ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang turut membantu kelancaran selama pengerjaan tugas akhir ini. Mungkin ucapan ini tidak sebanding dengan apa yang diberikan oleh pihak – pihak tersebut, namun diharapkan dapat menjadi sebuah pembelajaran untuk penulis agar senantiasa berterima kasih kepada pihak yang telah memberikan banyak bantuan dalam tugas akhir ini. Beberapa pihak tersebut diantaranya:

1. Allah SWT, karena atas berkat, rahmat, dan anugerah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Orang tua terbaik dan luar biasa yang pernah ada, Ayahanda, Rofi'i. Dan Ibunda, Suliha. Terima kasih atas segala doa, kasih sayang, perhatian, dukungan, kepercayaan, kesabaran, dan cinta yang telah diberikan selama ini.
3. Adik yang sangat saya banggakan, Narita Oktavian Solihah, untuk apa yang telah diberikan selama ini. Terima kasih atas dukungan dan telah menjadi motivasi saya selain Ibu dan Ayah.
4. Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc. dan Bapak Nur Syahroni, ST., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini, atas bantuan masukan, dukungan dan ilmu bermanfaat dalam mengerjakan dan menyusun Tugas Akhir.
5. Seluruh Dosen, Karyawan, Tim tata usaha dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK ITS, yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada penulis selama menjalani perkuliahan dan menyelesaikan tugas akhir.
6. Bapak Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen wali saya yang telah membantu dan mengarahkan selama saya berkuliah di Teknik Kelautan.
7. Bapak Richard Manurung, Hafidz Permana, dan Muhammad Zaki Putrajaya dari PHE WMO selaku orang – orang yang telah membantu saya dalam menyediakan data – data tugas akhir,

memberikan motivasi dan bimbingan serta senantiasa mendoakan dari awal hingga akhir.

8. Terima kasih untuk teman – teman satu bimbingan (Keluarga Imam & Keluarga Syahroni) seperjuanganku, yang telah menjadi teman *sharing* dalam pengerjaan tugas akhir ini.
9. Keluarga besar angkatan TRITONOUS P-55 L-33, yang selalu mendukung penulis hingga selesainya tugas akhir ini. Terima kasih telah menjadi keluarga baru dari awal kehadiran penulis di ITS.
10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah turut berperan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	I
LEMBAR PENGESAHAN	III
ABSTRAK	IV
ABSTRACT	V
KATA PENGANTAR	VI
UCAPAN TERIMA KASIH	VII
DAFTAR ISI	IX
DAFTAR GAMBAR	XIII
DAFTAR TABEL	XV
DAFTAR NOTASI	XVIII
DAFTAR LAMPIRAN	XXIII

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Batasan Masalah	5
1.6 Sistematika Penulisan	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka	8
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Bentangan Bebas (<i>Freespan</i>)	10
2.2.2 Klasifikasi Morfologi <i>Free Span</i>	11
2.2.3 Kondisi Pembebanan Pipa	12
2.2.4 Dimensi Pipa	13
2.2.5 Massa Efektif Pipa.....	15
2.2.6 Berat Terendam Pipa	17

2.2.7	Beban Lingkungan	17
2.2.7.1	Gelombang.....	17
2.2.7.2	Arus.....	21
2.2.8	Kriteria <i>Current Flow Ratio</i>	22
2.2.9	Gaya Hidrodinamis	24
2.2.9.1	Gaya <i>Drag</i>	24
2.2.9.2	Gaya Inersia.....	26
2.2.9.3	Gaya <i>Lift</i>	27
2.2.10	<i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	27
2.2.10.1	Frekuensi <i>Vortex Shedding</i>	28
2.2.10.2	<i>Reynolds Number</i>	29
2.2.10.3	<i>Stability Parameter</i>	31
2.2.10.4	<i>Reduced Velocity</i>	32
2.2.10.5	Keulegan-Carpenter <i>Number</i>	32
2.2.10.6	<i>Current Flow Ratio</i>	32
2.2.11	<i>Safety Factor</i>	33
2.2.12	<i>Dynamic Soil Stiffness</i>	34
2.2.12.1	Koefisien <i>Dynamic Soil Stiffness</i>	35
2.2.12.2	<i>Poisson Ratio</i> Tanah.....	35
2.2.13	Frekuensi Natural Pipa	36
2.2.13.1	<i>Effective Axial Force</i>	36
2.2.13.2	<i>Critical Buckling Load</i>	37
2.2.13.3	<i>Static Deflection</i>	38
2.2.13.4	<i>Concrete Stiffness Factor</i>	38
2.2.13.5	<i>Boundary Condition</i>	39
2.2.13.6	Panjang <i>Span</i> Efektif	40
2.2.14	<i>Response Model</i> dan <i>Screening Kriteria Fatigue</i>	40
2.2.14.1	<i>In-Line Response Model</i>	41
2.2.14.2	<i>Cross-Flow Response Model</i>	44
2.2.15	Tegangan Pada Pipa	46
2.2.15.1	Tegangan <i>Hoop</i>	46
2.2.15.2	Tegangan <i>Longitudinal</i>	46

2.2.15.3 Tegangan <i>Von Mises</i>	46
2.2.16 Umur Kelelahan Pipa	50
2.2.16.1 <i>Fatigue Damage</i>	50
2.2.16.2 Perkiraan Sisa Waktu Operasi <i>Pipeline</i>	54

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian	57
3.2 Prosedur Penelitian	60

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data	66
4.1.1 Data <i>Pipeline</i>	67
4.1.2 Data Lingkungan (<i>Metoccean Data</i>)	68
4.1.3 Data Inspeksi <i>Freespan</i>	70
4.2 Analisis Dimensi Pipa	71
4.2.1 Perhitungan Dimensi Pipa.....	71
4.2.2 Perhitungan Massa Efektif Pipa	72
4.2.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa	74
4.3 Analisis Kecepatan Partikel Air	74
4.3.1 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa	74
4.3.2 Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang	76
4.4 Analisis <i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	78
4.5 Analisis Gaya Hidrodinamis.....	82
4.5.1 Perhitungan Gaya <i>Drag</i>	82
4.5.2 Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	84
4.5.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis.....	85
4.6 Analisis Panjang Bentangan.....	86
4.6.1 <i>Boundary Condition</i>	86
4.6.2 Analisis <i>Dynamic Soil Stiffness</i> dan <i>Allowable span</i> Kritis	87
4.6.3 <i>Effective Axial Force</i>	90
4.6.4 <i>Critical Buckling Load</i>	91
4.6.5 <i>Static Deflection</i>	92
4.6.6 Frekuensi Natural Pipa	94

4.7	Screening VIV, Kriteria Kelelahan dan Panjang Span	97
4.8	Analisis <i>Stress Range</i> Bentangan Bebas Pipa	103
4.8.1	<i>In-Line Response Model</i>	103
4.8.2	<i>Cross Flow Response Model</i>	104
4.9	Analisis Tegangan Ekvivalen	107
4.9.1	<i>Hoop Stress</i>	107
4.9.2	<i>Longitudinal Stress</i>	110
4.9.3	<i>Von Mises Stress</i>	110
4.10	Pemodelan Bentangan Bebas	111
4.10.1	Pemodelan Aliran (ANSYS CFX)	111
4.10.2	Hasil Pemodelan (ANSYS CFX).....	114
4.10.3	Pemodelan Tegangan (ANSYS Static Structural).....	115
4.10.4	Hasil Pemodelan Tegangan (ANSYS Static Structural).....	117
4.11	Analisis Umur Kelelahan	118
4.11.1	<i>Unit Stress Amplitude</i>	118
4.11.2	<i>Stress Range</i>	120
4.11.3	Analisis Siklus Tegangan	121
4.11.4	Akumulasi <i>Fatigue Damage</i>	126
4.11.5	<i>Fatigue Life</i>	128

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	131
5.2	Saran.....	132
	DAFTAR PUSTAKA	133

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi <i>Free Span</i> di Dasar Laut (Bai et al, 2014).....	2
Gambar 1.2 Fasilitas Produksi <i>West Madura Offshore</i> (PHE WMO,2013).....	3
Gambar 2.1 Ilustrasi Jaringan Pipa Bawah Laut (Bai et al, 2014).....	8
Gambar 2.2 Ilustrasi <i>Freespan</i> (Albert. 2011).....	10
Gambar 2.3 Klasifikasi Grafik <i>Free Span</i> dan Interaksi dengan Tanah (DNV GL RP F 105, 2017).....	11
Gambar 2.4 <i>Reduction Factor</i> Akibat Gelombang (DNV GL RP F105, 2017)....	20
Gambar 2.5 Grafik $\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$ untuk $KC < 5$ (DNV GL RP F105, 2017).....	25
Gambar 2.6 Ilustrasi <i>Vortex Induced Vibration</i> pada Pipa (Mouselli, 1981).....	28
Gambar 2.7 Regime Aliran Fluida Pada Silinder Halus (Lienhard, 1966).....	30
Gambar 2.8 Prinsip umum Respon Model In-Line.....	41
Gambar 2.9 Grafik <i>turbulence intensity</i>	42
Gambar 2.10 Grafik hubungan <i>in-line VIV amplitude</i> dengan V_r	43
Gambar 2.11 Prinsip Umum Response Amplitudo Az/D.....	45
Gambar 2.12 Ilustrasi Respon Amplitudo pada <i>In-Line VIV</i>	52
Gambar 2.13 Ilustrasi Respon Amplitudo pada <i>Cross-Flow VIV</i>	52
Gambar 2.14 <i>Plotting Stress S-N Curve</i> di <i>Seawater</i> (DNV RP C203, 2005)....	54
Gambar 4.1 Peta Lokasi Jalur Pipa <i>CPP 2 – ORF</i> (PHE WMO, 2015).....	66
Gambar 4.2 Grafik Hubungan Panjang <i>freespan</i> - Frekuensi Natural Pipa.....	97
Gambar 4.3 Prinsip umum Respon Model In-Line.....	101
Gambar 4.4 Prinsip umum Respon Model <i>Crossflow</i>	103
Gambar 4.5 Pemodelan <i>Pipeline</i> dengan Panjang 19.15 m.....	112

Gambar 4.6 <i>Meshing</i> pada dua blok objek.....	112
Gambar 4.7 Penamaan <i>setup</i> pada ANSYS CFX.....	113
Gambar 4.8 Pemberian <i>boundary condition</i> pada model	113
Gambar 4.9 Hasil <i>Running</i> Interaksi Fluida dengan Pipa.....	114
Gambar 4.10 Aliran Kecepatan Fluida setelah Mengenai Pipa.....	115
Gambar 4.11 Beban Kombinasi pada Pipa.....	116
Gambar 4.12 <i>Output</i> Nilai Tegangan Ekuivalen (<i>Von Mises Stress</i>).....	117
Gambar 4.13 Ilustrasi Arah Aliran Arus yang Mengenai Pipa.....	117

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Seabed Roughness Parameter</i>	22
Tabel 2.2 Kriteria Respon Pipa Terhadap Rasio Aliran Arus	23
Tabel 2.3 Kekasaran Permukaan Pipa	25
Tabel 2.4 <i>Safety Factor</i> untuk <i>Screening Criteria</i>	33
Tabel 2.5 <i>Safety Factor</i> untuk Parameter VIV	33
Tabel 2.6 Koefisien <i>Dynamic Soil Stiffness</i> untuk Tanah Jenis Pasir	35
Tabel 2.7 Koefisien <i>Poisson Ratio</i> untuk Jenis Tanah Pasir	35
Tabel 2.8 <i>Boundary Condition Coefficient</i>	39
Tabel 2.9 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8	47
Tabel 2.10 Tabel <i>S-N Curve</i> di <i>Seawater</i> dengan <i>Cathodic Protection</i>	53
Tabel 2.11 <i>Allowable Damage Ratio for Fatigue</i>	55
Tabel 4.1 Data Desain Pipa	66
Tabel 4.2 Data Anti <i>Corrosion Coating</i> dan <i>Concrete Coating</i>	68
Tabel 4.3 Data Lingkungan.....	69
Tabel 4.4 Data Karakteristik Tanah	70
Tabel 4.5 Data <i>Free Span</i> Hasil Inspeksi Bawah Laut.....	70
Tabel 4.6 Perhitungan Dimensi Pipa	71
Tabel 4.7 Massa Pipa di Udara	72
Tabel 4.8 Perhitungan Massa Efektif	72
Tabel 4.9 Perhitungan Berat Terendam Pipa.....	74
Tabel 4.10 Perhitungan Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa	75
Tabel 4.11 Data Gelombang Perairan Madura.....	76
Tabel 4.12 Parameter Spektrum JONSWAP	76
Tabel 4.13 Hasil Kecepatan Arus Signifikan Normal pada Pipa	77
Tabel 4.14 Total Kecepatan Arus.....	78
Tabel 4.15 Parameter Awal Perhitungan Parameter VIV	79
Tabel 4.16 Perhitungan <i>stability Parameter</i>	79
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Nilai KC dan <i>Reduced Velocity</i>	81

Tabel 4.18 Parameter Koefisien <i>Drag</i>	82
Tabel 4.19 Hasil Koefisien <i>Drag</i>	82
Tabel 4.20 Hasil Gaya <i>Drag</i>	83
Tabel 4.21 Parameter Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	84
Tabel 4.22 Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	84
Tabel 4.23 Perhitungan Gaya Hidrodinamis	85
Tabel 4.24 Koefisien <i>Boundary Condition</i>	87
Tabel 4.25 Parameter <i>Dynamic Soil Stiffness</i>	87
Tabel 4.26 Perhitungan <i>Dynamic Soil Stiffness</i>	88
Tabel 4.27 Parameter Perhitungan Panjang <i>Span</i> Efektif.....	88
Tabel 4.28 Perhitungan Panjang <i>Span</i> Efektif (<i>In-Line</i> dan <i>Cross-Flow</i>)	89
Tabel 4.29 Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>	90
Tabel 4.30 Perhitungan Nilai Perbedaan Tekanan	90
Tabel 4.31 Parameter Perhitungan <i>Critical Buckling Load</i>	91
Tabel 4.32 Nilai <i>Critical Buckling Load</i> Untuk Arah <i>In-line</i> dan <i>Cross-flow</i>	91
Tabel 4.33 Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>	92
Tabel 4.34 Nilai <i>Static Deflection</i> Arah <i>In-Line</i>	92
Tabel 4.35 Nilai <i>Static Deflection</i> Arah <i>Cross-Flow</i>	93
Tabel 4.36 Parameter Perhitungan <i>Natural Frequency</i>	95
Tabel 4.37 Nilai Frekuensi Natural Arah <i>In-Line</i>	95
Tabel 4.38 Nilai Frekuensi Natural Arah <i>Cross-Flow</i>	96
Tabel 4.39 Perhitungan <i>screening</i> L/D pada Bentangan Pipa.	97
Tabel 4.40 Parameter <i>Screening Fatigue</i>	98
Tabel 4.41 Hasil <i>Screening</i> Kelelahan arah <i>In-Line</i>	99
Tabel 4.42 Hasil <i>Screening</i> Kelelahan arah <i>Cross-Flow</i>	100
Tabel 4.43 Parameter <i>Response Model In-Line</i>	101
Tabel 4.44 <i>Reduced Velocity onset</i> kondisi <i>Inline</i>	102
Tabel 4.45 Parameter <i>Response Model Cross flow</i>	103
Tabel 4.46 <i>Reduced Velocity onset</i> kondisi <i>cross-flow</i>	104
Tabel 4.47 Parameter Perhitungan <i>Hoop Stress</i>	107
Tabel 4.48 Perhitungan Tegangan <i>Hoop</i>	107

Tabel 4.49 Perhitungan Cek Batas Ijin ASME B.31.8.....	107
Tabel 4.50 Perhitungan Tegangan <i>Longitudinal</i>	108
Tabel 4.51 Perhitungan Akumulasi Tegangan <i>Longitudinal</i>	109
Tabel 4.52 Perhitungan Validasi Von Mises <i>Stress</i>	110
Tabel 4.53 Input Pembebanan pada Model Pipa.....	116
Tabel 4.54 Hasil Validasi Tegangan Perhitungan menurut DNV GL RP F 105 dan Pemodelan.....	117
Tabel 4.55 Perhitungan <i>Unit Stress Amplitude</i>	118
Tabel 4.56 Nilai <i>Unit Stress Amplitude In-Line & Cross-Flow</i>	118
Tabel 4.57 Perhitungan <i>stress range</i> kondisi <i>In-line</i>	119
Tabel 4.58 Perhitungan <i>stress range</i> kondisi <i>cross-flow</i>	120
Tabel 4.59 Data <i>Occurrence</i> Arus PHE WMO 1992-2010.....	121
Tabel 4.60 Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> dan Siklus pada Pipa (<i>In-line</i>).....	121
Tabel 4.61 Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> dan Siklus pada Pipa (<i>cross-flow</i>).....	122
Tabel 4.62 Parameter Siklus Tegangan.....	123
Tabel 4.63 Perhitungan Jumlah Siklus Kegagalan Tegangan Pipa (<i>In-line</i>)....	124
Tabel 4.64 Perhitungan Jumlah Siklus Kegagalan Tegangan Pipa (<i>cross-flow</i>).124	
Tabel 4.65 Perhitungan <i>Fatigue Damage</i> Kondisi <i>In-Line</i>	126
Tabel 4.66 Perhitungan <i>Fatigue Damage</i> Kondisi <i>Cross-flow</i>	126
Tabel 4.67 Perhitungan <i>Fatigue Life</i> Kondisi <i>In-Line</i>	127
Tabel 4.68 Perhitungan <i>Fatigue Life</i> Kondisi <i>Cross-flow</i>	129

DAFTAR NOTASI

A_i	= luas penampang internal pipa
A_{IL}	= <i>in-line unit amplitude stress</i>
A_{CF}	= <i>cross-flow unit amplitude stress</i>
A_s	= luas penampang luar pipa
(A_Y/D)	= <i>Normalised in-line VIV amplitude</i>
(A_Z/D)	= <i>Normalised cross-flow VIV amplitude</i>
C_a	= Koefisien massa tambah
C_D	= koefisien <i>drag</i>
C_M	= koefisien inersia
C_L	= Koefisien lateral kekakuan tanah
C_V	= koefisien vertical kekakuan tanah
C_{1-6}	= koefisien Boundary condition
d	= kedalaman <i>trenching</i>
D	= Diameter total pipa
D_{fat}	= <i>deterministic fatigue damage</i>
D_s	= Diameter pipa luar
E	= <i>Young's modulus</i>
EI	= <i>bending stiffness</i>
e	= gap dasar laut
e_s	= <i>void ratio</i>
(e/D)	= <i>seabed gap ratio</i>
f_n	= frekuensi natural gelombang
f_s	= <i>vortex shedding frequency (Strouhal frequency)</i>
f_w	= wave frequency
g	= percepatan gravitasi
$G(\omega)$	= <i>frequency transfer function</i>
H_{eff}	= <i>effective lay tension</i>
H_s	= gelombang signifikan
h	= kedalaman laut
I	= momen inersia

I_c	= <i>turbulence intensity</i>
K	= <i>soil stiffness</i>
K_L	= <i>lateral (horizontal) dynamic soil stiffness</i>
K_V	= <i>vertical dynamic soil stiffness</i>
(k/D)	= <i>pipe roughness</i>
K_C	= <i>Keulegan Carpenter number</i>
K_S	= <i>Stability parameter</i>
L	= <i>panjang bentang bebas</i>
L_a	= <i>panjang span adjacent</i>
L_{eff}	= <i>panjang bentangan efektif</i>
L_{sh}	= <i>length of span shoulder</i>
m_e	= <i>massa efektif</i>
m	= <i>fatigue exponent</i>
M_{static}	= <i>static bending moment</i>
M_n	= <i>spectral moments of order n</i>
n_i	= <i>jumlah stress cycles untuk tegangan</i>
N_i	= <i>jumlah siklus kegagalan untuk tegangan</i>
N_c	= <i>soil bearing capacity parameter</i>
N_q	= <i>soil bearing capacity parameter</i>
N_γ	= <i>soil bearing capacity parameter</i>
P_e	= <i>Tekanan eksternal</i>
P_i	= <i>Tekanan internal</i>
q	= <i>beban defleksi</i>
P_{cr}	= <i>critical buckling load</i>
R_c	= <i>current reduction factor</i>
R_D	= <i>reduction factor gelombang</i>
$R_{I\theta}$	= <i>reduction factor from turbulence and flow direction</i>
R_k	= <i>reduction factor from damping</i>
R_e	= <i>Reynolds Number</i>

S	= <i>stress range</i>
S_{eff}	= <i>effective axial force</i>
$S_{\eta \eta}$	= <i>wave spectral density</i>
S_{UU}	= spectra kecepatan gelombang pada pipa
s_u	= <i>undrained shear strength</i>
S_t	= <i>Strouhal number</i>
t	= <i>pipe wall thickness</i>
T_{exposure}	= beban waktu terjadinya siklus
T_{life}	= umur desain operasi
T_p	= <i>peak period</i>
T_u	= <i>mean zero up-crossing period</i>
T_w	= <i>wave period</i>
U	= kecepatan arus
U_c	= kecepatan arus terhadap pipa
U_s	= kecepatan gelombang signifikan
U_w	= Kecepatan arus akibat gelombang
v	= vertical soil settlement (pipe embedment)
V_R	= <i>reduced velocity</i>
V_{Rd}	= <i>reduced velocity (design value) with safety factor</i>
z	= height above seabed or in-line pipe displacement
z_0	= sea-bottom roughness
z_r	= reference (measurement) height

1.14.2 Greek

α	= current flow velocity ratio, generalised Phillips' constant
α_e	= temperature expansion coefficient
α_{fat}	= Allowable fatigue damage ratio according to DNV OS-F101
α_T	= parameter to determine wave period
β	= Weibull shape parameter and relative soil stiffness parameter
Δ/D	= relative trench depth

Δp_i	= internal pressure difference relative to laying
ΔT	= temperature difference relative to laying or storm duration
δ	= pipe deflection or statistical skewness
ε	= band-width parameter
Γ	= gamma function
γ	= peak-enhancement factor for JONSWAP spectrum parameter
γ_{soil}	= total unit weight of soil
$\gamma_{\text{soil}'}$	= submerged unit weight of soil
γ_{water}	= unit weight of water
γ_s	= safety factor on stress amplitude
γ_f	= safety factor on natural frequency
γ_{CF}	= safety factor for cross-flow screening criterion
γ_{IL}	= safety factor for in-line screening criterion
γ_k	= safety factor on stability parameter
$\gamma_{\text{on,IL}}$	= safety factor on onset value for in-line VR
$\gamma_{\text{on,CF}}$	= safety factor on onset value for cross-flow VR
κ	= curvature
λ_1	= mode shape factor
λ_{max}	= equivalent stress factor
η	= usage factor
μ	= mean value
μ_a	= axial friction coefficient
μ_L	= lateral friction coefficient
ν	= Poisson's ratio or kinematic viscosity ($\approx 1.5 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s])
φ	= mode shape
ϕ_{CM}^s	= angle of friction, cohesionless soils
ψ_{CM}^k	= correction factor for CM due to pipe roughness
ψ_{CM}^{trench}	= correction factor for CM due to effect of pipe in trench

ψ_{CD}^{proxi} = reduction factor for CM due to seabed proximity

$\psi_{KC,\alpha}$ = correction factor for CD due to Keulegan-Carpenter number and current flow ratio.

ψ_{CD}^{trench} = correction factor for CD due to effect of pipe in trench

ψ_{CD}^{VIV} = amplification factor for CD due to cross-flow vibrations

ϕ_{proxy} = reduction factor for CD due to seabed proximity

$\phi_{proxy, onset}$ = correction factor for onset cross-flow due to seabed proximity

$\phi_{trench, onset}$ = reduction factor for onset cross-flow due to the effect of a trench

$\phi_{\alpha, IL}$ = correction factor for onset of in-line due wave

ρ = density of water

ρ_s / ρ = specific mass ratio between the pipe mass (not including added mass) and the displaced water.

σ = stress, spectral width parameter or standard deviation

θ_{rel} = relative angle between flow and pipeline direction flow direction

ζ_T = total modal damping ratio

ζ_{soil} = soil modal damping ratio

ζ_{str} = structural modal damping ratio

ζ_h = hydrodynamic modal damping ratio

ω_n = angular natural frequency

ω = angular wave frequency

ω_p = angular spectral peak wave frequency

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Perhitungan Dimensi, Massa Efektif Dan Berat Pipa Terendam
Lampiran B	Perhitungan Kecepatan Partikel Air Pada Pipa (Akibat Arus Dan Gelombang)
Lampiran C	Perhitungan <i>Vortex Induced Vibration</i>
Lampiran D	Perhitungan <i>Dynamic Soil Stiffness</i> Dan <i>Concrete Stiffness Factor</i>
Lampiran E	Perhitungan <i>Panjang Span Efektif, Effective Axial Force, Critical Buckling Load, Static Deflection, Dan Frekuensi Natural Pipa</i>
Lampiran F	<i>Screening Allowable Span</i> dan <i>Kriteria Fatigue</i>
Lampiran G	Perhitungan <i>Response Model</i>
Lampiran H	Perhitungan <i>Unit Stress Amplitude</i> dan <i>Stress Range</i>
Lampiran I	Perhitungan <i>Fatigue Life</i>
Lampiran J	Perhitungan Tegangan Ekuivalen (<i>Von Mises Stress</i>)
Lampiran K	ANSYS CFX dan ANSYS Static Structural

BAB I

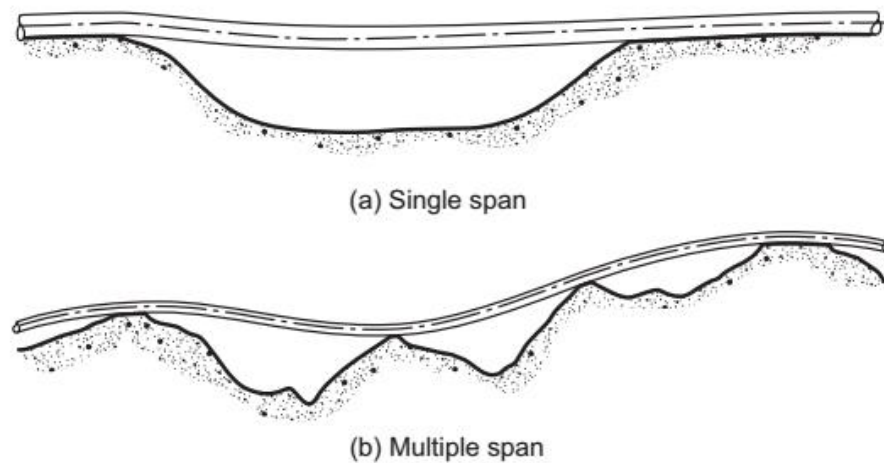
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jaringan pipa bawah laut (*subsea pipeline*) digunakan untuk sejumlah tujuan dalam perkembangan pemanfaatan sumber hidrokarbon bawah laut. Pemanfaatan jaringan pipa digunakan untuk mengalirkan minyak dan gas dianggap lebih praktis dan efektif dibanding dengan cara curah (Soegiono, 2007). *Subsea Pipeline* merupakan salah satu jenis fasilitas yang berada di laut yang berfungsi sebagai penyalur hasil produksi berupa gas atau minyak dari suatu platform menuju platform lainnya (unit pemrosesan selanjutnya). Kelebihan *Subsea Pipeline* ini dapat memenuhi kebutuhan transportasi hasil produksi secara lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan bentuk unit penyimpanan minyak atau gas yang bersifat sementara (Q. Bai *et al*, 2014)

Subsea Pipeline menjadi sebuah alternatif dalam pendistribusian minyak dan gas dari laut ke darat (Guo *et al*, 2005). Namun berbagai fenomena yang terjadi pada saat pengoperasian jaringan pipa, seperti kelelahan karena bentangan bebas (*fatigue*), korosi, maupun retak (*crack*) yang menyebabkan kegagalan pipa dan harus dilakukan inspeksi secara berkala untuk meningkatkan kehandalan dari pipa (Bai *et al*, 2014). Bentangan bebas (*free span*) adalah salah satu dari fenomena yang mengakibatkan kegagalan pada sebuah jaringan pipa bawah laut (*Subsea Pipeline*). Berawal dari kelelahan yang terjadi karena perubahan dalam topologi dasar laut, *crossing pipelines*, dan penggerusan (*scouring*) (Bai, 2014).

Free span yang terjadi pada pipa bawah laut tidak terbatas pada jenis *span* tunggal (*single span*), beberapa konfigurasi topologi dasar laut yang beragam mengakibatkan tipikal *multiple span* kemungkinan besar terjadi. di mana *span* berada dalam jarak yang cukup dekat dan menghasilkan interaksi anatara *span* satu dengan yang *span* lainnya. Gambar 1.1 mengilustrasikan tipikal *free span* yang terbentuk di dasar laut, di mana (a) *Single Span* dan (b) *Multiple Span*



Gambar 1.1 Ilustrasi *Free Span* di Dasar Laut (Bai *et al*, 2014)

Free span yang terjadi akan mengalami vibrasi akibat gaya hidrodinamika yang bekerja pada *segment* tersebut atau biasa disebut fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). Fenomena VIV terjadi akibat terbentuknya *vortex* di belakang pipa yang membelakangi arah aliran arus yang membentur pipa sehingga berdampak pada tekanan di area belakang pipa menjadi lebih kecil dibandingkan di area depan pipa sehingga menyebabkan terjadinya vibrasi. Vibrasi yang terbentuk ini akan menyebabkan terjadinya kelelahan (*fatigue*) pada pipa (K. Rezazadeh *et al*, 2010). Menurut DNV RP-F105, analisis kelelahan pipa harus dilakukan pada setiap tahap (yaitu instalasi dan operasi). Jika frekuensi *vortex shedding* yang disebabkan oleh aliran normal mencapai ke frekuensi alami pipa, pipa mulai bergetar dan terjadi *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang pada akhirnya menyebabkan kelelahan pada pipa (B.M Summer, 2006). Sehingga perlu adanya analisis mengenai kondisi *free span* yang terjadi.

PT. Pertamina Hulu Energi – *West Madura Offshore* adalah salah satu operator *Production sharing Contract* (PSC) nasional, dalam bidang bisnis eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas (PHE WMO,2013). Sebagai salah satu Kontraktor Kontrak Kerjasama SKP (KKKS), PHE WMO memiliki beberapa fasilitas produksi dan jaringan pipa bawah laut. Salah satunya adalah

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang menjadi objek studi Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai tegangan ekivalen (*Von Mises*) pada masing – masing *span* berdasarkan kriteria *screening* kelelahan menurut DNV GL RP F105?
2. Berapa panjang *allowable span* kritis berdasarkan kriteria *screening* kelelahan menurut DNV GL RP F105?
3. Berapa umur kelelahan pada masing – masing *span* yang ditinjau menurut DNV GL RP F105?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai tegangan ekivalen (*Von Mises*) pada masing – masing *span* berdasarkan kriteria *screening* kelelahan menurut DNV GL RP F105.
2. Mengetahui panjang *allowable span* kritis berdasarkan kriteria *screening* kelelahan menurut DNV GL RP F105.
3. Mengetahui umur kelelahan pada masing – masing *span* yang ditinjau menurut DNV GL RP F105.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diambil dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dari analisis tegangan ekivalen, penulis diharapkan mampu menunjukkan perhitungan analisis tegangan sesuai dengan *code ASME B 31.8.2000* mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*) serta menunjukkan perhitungan tegangan pada pipa yang ditinjau apakah masih dalam berada batas aman yang ditentukan.
2. Dari segi analisis panjang *allowable span*, diharapkan mampu menunjukkan panjang bentangan bebas yang memenuhi kriteria *screening* pada analisis dinamis *free span* menurut DNV RP F105.
3. Sedangkan dari analisis dinamis dan kelelahan dari *free span*, penulis dapat membuktikan analisis *free span* yang (untuk

arah *in-line* maupun arah *cross-flow*) mendapatkan pengaruh VIV (*vortex induced vibration*) sehingga terjadi vibrasi dan menyebabkan kelelahan atau tidak berdasarkan *screening* yang telah ditetapkan (sesuai dengan *code* DNV-RP-F105 mengenai *Free Spanning Pipelines*), dan menunjukkan langkah yang sesuai dalam mencari umur kelelahan pada *span* yang ditinjau.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis *span* yang ditinjau diasumsikan sebagai *single span*.
2. Analisis tegangan pipa, statis dan dinamis *free span* dilakukan hanya pada kondisi operasi saja
3. Pengaruh *scouring* dan *marine growth* diabaikan.
4. Kedalaman pada suatu bentangan bebas pipa dianggap sama dan rata.
5. Aliran yang mengenai pipa adalah tegak lurus dengan pipa.
6. Aliran fluida di dalam pipa diasumsikan aliran *steady*.
7. Tumpuan pada ujung - ujung bentangan bebas pipa diasumsikan sebagai tumpuan sederhana (*pinned-rolled*)
8. Perhitungan *dynamic analysis* dan *fatigue analysis* hanya dilakukan pada lokasi *span* yang ditinjau.
9. Tanah diasumsikan berjenis *fine to loose sand* dan homogen di sepanjang pipa
10. Analisis dinamis dan kelelahan *free span* menggunakan *code* DNV GL RP F105 tahun 2017 mengenai *Free Spanning Pipelines*.
11. Analisis tegangan pada *free span* menggunakan ASME B31.8 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*.

1.6 Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan beberapa hal yang membuat penelitian tugas akhir ini dilakukan, yaitu kondisi yang melatar belakangi sehingga penelitian ini penting untuk dilakukan. Perumusan masalah yang menjadi permasalahan dan perlu dijawab, pencapaian yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang diangkat, manfaat yang diperoleh dari dilakukannya penelitian tugas akhir, dan batasan dari penelitian tugas akhir ini, serta gambaran dari sistematika laporan yang digunakan dalam tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini berisi tinjauan pustaka dan dasar teori, sebagaimana tinjauan pustaka yakni penjelasan singkat hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini. Dan dasar teori yang berisi tulisan dan cuplikan penemuan ilmu pengetahuan dari peneliti, persamaan – persamaan yang terkait, dan *code* yang digunakan dalam penelitian tugas akhir sebagai pedoman dalam penelitian tugas akhir.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian menjelaskan langkah – langkah pengerjaan dalam menyelesaikan tugas akhir ini, serta metode – metode yang digunakan di dalamnya. Menunjukkan langkah-langkah sistematis dalam melakukan analisis dinamis *free span* dan analisis kelelahan.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan data – data yang digunakan dalam tugas akhir, melakukan perhitungan untuk analisis dinamis *free span* dan analisis umur kelelahan, menerangkan permodelan yang dilakukan saat penyelesaian penelitian, analisis, pengolahan, dan pembahasan data dari hasil luaran permodelan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Menjelaskan tentang kesimpulan dari tugas akhir, hasil dari analisis yang dilakukan, pembahasan yang telah dilakukan serta rekomendasi dan saran – saran penulis sebagai pertimbangan untuk keperluan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi referensi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir.

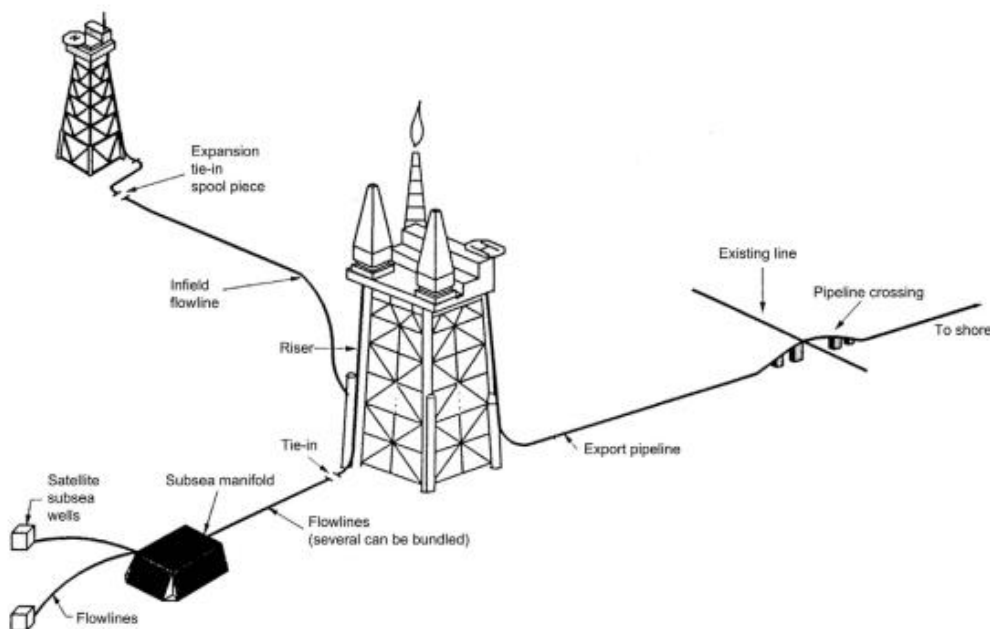
(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Jaringan pipa membentang di dasar laut memerlukan analisis *free span* untuk menentukan apakah ada atau tidak ada perbaikan yang memerlukan sebuah tindakan untuk menghindari kegagalan pada jaringan pipa bawah laut. Karakteristik statis dan dinamis dari bentang bebas pipa harus dianalisis untuk memastikan bahwa pipa dapat dipertahankan dalam keadaan aman yang dapat diterima. Jika dalam perhitungan ambang batas izin dari *free span* yang diperlukan melebihi ambang batas izin yang ditentukan, maka tindakan perbaikan dalam bentuk perubahan rute, mitigasi, digunakan untuk menghindari kegagalan jaringan pipa dalam kriteria desain mengenai nilai tegangan dan potensi kegagalan akibat kelelahan karena VIV (Bai *et al*, 2014). Gambar 2.1 menampilkan ilustrasi jaringan pipa bawah laut.



Gambar 2.1 Ilustrasi Jaringan Pipa Bawah Laut (Bai *et al*, 2014)

Analisis mengenai *free span* pada pipa bawah laut banyak dilakukan dalam beberapa *Thesis* dan Jurnal. Banyak dari mereka yang menganalisis kelelahan pada pipa bawah laut akibat dari adanya VIV karena disebabkan adanya *crossing pipeline*, analisis kelelahan akibat *free span* dengan batasan

span tunggal atau menghitung *scouring* yang terjadi pada pipa bawah laut yang mengakibatkan terjadinya *free span*. Lebih lanjut, pengaruh *vortex shedding* dan pembebanan gelombang langsung yang menyebabkan respon dinamis pada jaringan pipa yang mana secara umum menganalisis dengan pendekatan *fatigue limit states* (Blevins, 1990).

Seperti dalam, DNV GL RP F105 tahun 2017 menjelaskan bahwa metode analisis *span* dibagi menjadi 2 tahapan, terdiri dari analisis tegangan (ULS), dan analisis kelelahan (FLS). Analisis yang pertama adalah akibat *bending* yang berlebih karena beban berat pipa itu sendiri, yang kedua adalah kerusakan akibat *fatigue* dalam kurun waktu panjang, *free span* akan menghasilkan panjang *free span* yang diijinkan agar tegangan yang terjadi pada *free span* tidak melebihi tegangan *yield* material pipa. Aliran dari gelombang dan arus yang timbul di sekitar pipa akan menimbulkan pusaran yang menghasilkan distribusi tekanan. Pusaran ini menghasilkan osilasi atau getaran pada pipa. Jika frekuensi dari pusaran ini mendekati frekuensi natural pipa, maka terjadi resonansi, dan inilah yang menyebabkan kelelahan pada pipa (Bai, 2001).

Adhitya P (2018), telah melakukan analisis umur kelelahan akibat *free span* yang terjadi pada *export pipeline* saat kondisi operasi dengan mengasumsikan *span* yang terjadi adalah *span* tunggal. Sementara untuk penentuan sisa umur kelelahan bentangan bebas pipa dilakukan menggunakan *stress range* dari *response model* yaitu *VIV amplitude stress*. Sedangkan perhitungan beban yang lain tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu menghitung umur kelelahan akibat perubahan topologi dasar laut dimana *span* yang terjadi adalah tipe *Multi-Span*.

Idham (2010), telah melakukan analisis tegangan dan kelelahan akibat pengaruh *vortex induced vibration* (VIV) yang terjadi pada lokasi *crossing pipelines* dengan asumsi pemberian *support* pada *kilometre point* tertentu. Akan tetapi, analisis yang dibahas di dalam tugas akhir belum mencantumkan panjang *span* aktual dan keterbatasan dalam data *metocean*

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Bentangan Bebas (*Free Span*)

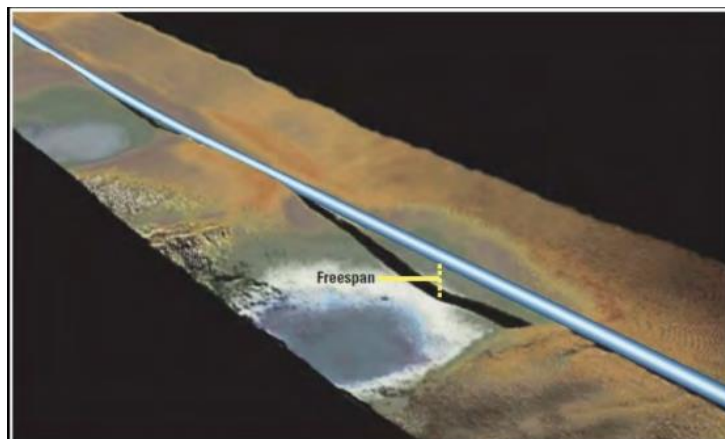
Secara definisi, bentang bebas yang dalam selanjutnya disebut *free span* pada pipa bawah laut dapat terjadi ketika kontak antara pipa dan *seabed* hilang dan memiliki jarak pada permukaan *seabed* (Guo *et.al*, 2005). *Free span* pada pipa dapat terjadi karena (DNV GL-RP-F105, 2017):

1. Permukaan *seabed* yang tidak merata.
2. Perubahan kontur dasar laut (akibat *scouring*, *sand waves*)
3. *Support* buatan.

Adanya *free span* pipa ini membutuhkan sebuah *analisis*. Hal ini karena pada *free span* pipa bekerja gaya-gaya yang dapat menyebabkan kegagalan pipa. Pada *free span* pipa harus cukup kuat melawan:

1. *Excessive yielding*
2. *Fatigue*
3. *Buckling*
4. Ovalisasi

Pada tahap *engineering & technical design*, pipa tidak disiapkan khusus dengan perlindungan terhadap *free span* dikarenakan biaya kapital yang menjadi lebih besar. *Free span* sangat beresiko dan memiliki resiko untuk memiliki kegagalan. Salah satu resiko yang menyebabkan kegagalan adalah adanya fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). Gambar 2.2 menampilkan ilustrasi bentangan bebas pada pipa bawah laut.

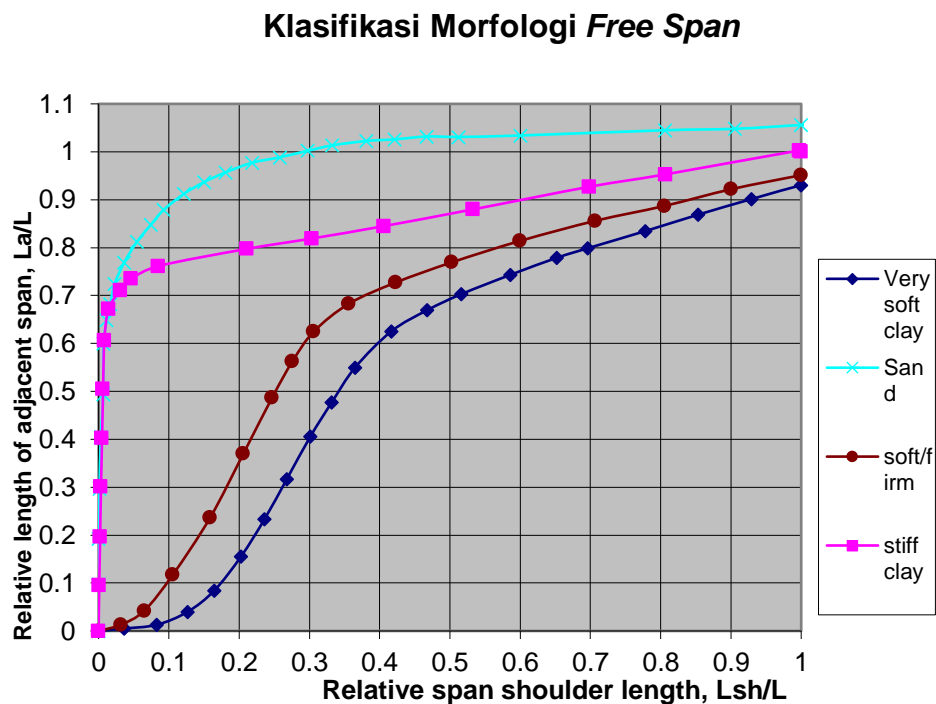


Gambar 2.2 Ilustrasi *Freespan* (Albert. 2011)

2.2.2 Klasifikasi Morfologi *Free Span*

Tura et al. (1994) mengembangkan model yang disederhanakan untuk klasifikasi interaksi modal *freespan* untuk *multi-span*. Dalam konteks perhitungan awal dan penilaian *multi-span* yang disederhanakan, model ini diterapkan untuk mendapatkan perkiraan kasar sifat interaksi rentang. Berdasarkan pendekatan Tura et al. (1994), pendekatan awal yang disederhanakan untuk interaksi *span*, seperti yang ditemukan pada Gambar 1-5, dapat digunakan untuk menunjukkan jika rentang *ter-isolated* atau berinteraksi tergantung pada jenis tanah, panjang bentangan dan panjang *support* bentangan.

Gambar 2.3 menunjukkan bahwa untuk skenario *span* yang ditinjau, bentangan akan cenderung berinteraksi lebih banyak dengan tanah yang memiliki *roughness* lunak. Namun, untuk profil dasar laut yang diberikan, tanah yang lebih lunak akan cenderung memiliki rentang yang lebih pendek dan lebih sedikit dan mungkin rentang yang kurang berinteraksi dari tanah yang lebih keras.



Gambar 2.3 Klasifikasi Grafik *Free Span* dan Interaksi dengan Tanah (DNV GL RP F 105, 2017)

2.2.3 Kondisi Pembebanan

Kenny (1993) mengklasifikasikan 4 kondisi pembebanan pipa bawah laut selama umur operasi, yaitu:

a. Instalasi

Beban utama yang bekerja pada kondisi instalasi pipa bawah laut adalah beban gelombang, beban arus *steady* dan beban pipa itu sendiri (*self-weight*). Selain itu, kombinasi tekanan dan beban *bending* akibat metode instalasi dan formasi *span* memberikan pengaruh signifikan pada perilaku pipa.

b. Kondisi Water Filled

Kondisi ini terjadi sebelum dan setelah dilakukan *hydrotest* pada pipa. Kondisi ini mungkin juga dapat terjadi jika pipa ditinggalkan sementara pada saat kondisi tertentu. Pipa yang ditinggalkan akan diisi air laut untuk meningkatkan stabilitas pipa (*on bottom stability*). Meningkatnya berat terendam pipa dapat mempengaruhi tegangan pada pipa.

c. Hydrotest

Pada saat *hydrotest*, pipa akan dialiri fluida (air laut) yang bertekanan tinggi yang melebihi tekanan desain pipa. Hal ini dilakukan untuk menguji integritas pipa bawah laut dan memeriksa ada tidaknya kebocoran pada pipa. Pipa pada kondisi ini akan mengalami pembebanan yang paling berat akibat kenaikan berat terendam dan tekanan internal yang tinggi.

d. Operasi

Setelah proses instalasi dan *hydrotest* dilakukan, pipa akan memasuki fase operasi. Pada saat operasi, pipa akan menerima tekanan internal dan suhu yang tinggi akibat aliran fluida (minyak atau gas) di dalam pipa.

2.2.4 Dimensi Pipa

Pipa bawah laut memiliki beberapa lapisan yaitu pipa baja, lapisan anti korosi (*corrosion coating*) dan selimut beton (*concrete coating*). Dimensi dari seluruh lapisan pipa ini harus dihitung sebagai langkah awal yang dilakukan dalam analisis pipa bawah laut. Persamaan untuk menghitung dimensi pipa diuraikan pada Persamaan 2.1– 2.9 sebagai berikut:

a. Tebal Dinding Pipa

Tebal dinding pipa yang dimaksud adalah ketebalan pipa tanpa ada tambahan perlindungan korosi, Persamaan tebal dinding pipa (DNV OS F101, 2013) dirumuskan pada Persamaan 2.1 sebagai berikut:

$$t_2 = t_{nom} - t_{corr} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana,

t_{nom} = tebal nominal dinding pipa (m)

t_{corr} = tebal *corrosion allowance* (m)

Tebal dinding pipa diatas digunakan untuk analisis kegagalan pipa dibawah pengaruh kondisi beban ekstrim dan pertimbangan kondisi operasi pipa.

b. Diameter Total Pipa

Diameter total pipa merupakan diameter pipa secara keseluruhan termasuk diameter pipa baja, lapisan anti korosi, selimut beton (*concrete coating*) dan *marine growth*. Diameter total pipa dirumuskan pada Persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$D_t = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{conc} + 2t_{mg} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana,

D_t = Diameter total pipa (m)

D_0 = Diameter luar pipa baja (m)

t_{cc} = Tebal lapisan anti korosi (m)

t_{conc} = Tebal concrete coating (m)

$$t_{mg} = \text{Tebal } \textit{marine growth} \quad (\text{m})$$

c. Diameter Dalam Pipa

Diameter dalam pipa adalah diameter maksimal yang dapat dilewati oleh fluida yang dialirkan di dalamnya. Ditampilkan pada Persamaan 2.3 berikut:

$$D_i = D_0 - 2(t_{nom} + t_{int}) \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana,

$$D_i = \text{Diameter dalam pipa} \quad (\text{m})$$

$$t_{int} = \text{Tebal lapisan anti-korosi internal} \quad (\text{m})$$

d. Diameter *Concrete Coating*

Concrete coating memiliki fungsi sebagai pemberat untuk meningkatkan stabilisasi pipa di dasar laut (Soegiono, 2007). Di dalam DNV OS F101, ketebalan minimal *concrete coating* adalah 40 mm. Diameter *concrete coating* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.4 berikut :

$$D_{wc} = D_0 + 2(t_{cc} + t_{conc}) \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana,

$$D_{wc} = \text{Diameter Selimut Beton} \quad (\text{m})$$

$$t_{conc} = \text{Tebal } \textit{Concrete Coating} \quad (\text{m})$$

e. Diameter Lapisan Anti Korosi (*Corrosion Coating*)

$$D_{cc} = D_0 + 2.t_{cc} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana,

$$D_{cc} = \text{Diameter corrosion coating} \quad (\text{m})$$

f. Momen Inersia Pipa Baja

$$I_{st} = \pi \frac{(D_o^4 + D_i^4)}{64} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana,

$$I_{st} = \text{Momen Inersia Pipa Baja} \quad (\text{m}^4)$$

g. Momen Inersia Selimut Beton

$$I_{conc} = \pi \frac{(Dt^4 + D_{conc}^4)}{64} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana,

$$I_{conc} = \text{Momen Inersia Selimut Beton} \quad (m^4)$$

h. Luas Penampang Internal Pipa Baja

$$A_i = \pi \frac{(Di^2)}{4} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana,

$$A_i = \text{Luas Penampang Internal Pipa Baja} \quad (m^2)$$

i. Luas Penampang Pipa Baja

$$A_{st} = \pi \frac{(D_o^2 - D_i^2)}{4} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana,

$$A_{st} = \text{Luas Penampang Pipa Baja} \quad (m^2)$$

2.2.5 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa merupakan penjumlahan massa pipa, massa konten pipa, massa tambah dan massa selimut beton pipa (*concrete*). Menurut bai dan bai (2005), persamaan massa efektif pipa dijelaskan pada Persamaan 2.10 sebagai berikut,

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana,

$$m_{str} = \text{Massa Struktur Pipa (termasuk } coating) \quad (kg/m)$$

$$m_c = \text{Massa konten Pipa} \quad (kg/m)$$

$$m_a = \text{Massa Tambah} \quad (kg/m)$$

a. Massa Struktur Pipa

Massa struktur pipa merupakan penjumlahan massa pipa ditambah dengan massa lapisan anti korosi dan selimut beton (*concrete*). Persamaan untuk mendapatkan massa struktur pada pipa dijelaskan pada Persamaan 2.11 – 2.14:

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$m_{st} = A_{st} + \rho_{st} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$m_{cc} = \pi \frac{(D_{cc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{cc} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$m_{conc} = \pi \frac{(D_{wc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{conc} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana,

m_{str}	= Massa struktur pipa	(kg/m)
m_{st}	= Massa pipa baja	(kg/m)
m_{cc}	= Massa lapisan anti korosi	(kg/m)
m_{conc}	= Massa selimut beton	(kg/m)
ρ_{st}	= Massa jenis baja	(kg/m ³)
ρ_{cc}	= Massa jenis lapisan anti korosi	(kg/m ³)
ρ_{conc}	= Massa jenis selimut beton	(kg/m ³)

b. Massa Konten Pipa

$$m_c = A_i + \rho_c \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana,

ρ_c	= Massa jenis konten pipa	(kg/m ³)
----------	---------------------------	----------------------

c. Massa Tambah Pipa

$$m_a = \frac{\pi}{4} D_t^2 \cdot \rho_w \cdot C_a \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana,

ρ_w	= Massa jenis air laut	(kg/m ³)
C_a	= Koefisien massa tambah	

Menurut DNV RP F105, koefisien massa tambah dapat ditentukan dengan Persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{1+5 \left(\frac{e}{Dt}\right)} & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) > 0.8 \end{cases} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana,

e/Dt	= Rasio gap span
e	= jarak antara seabed dan pipa

2.2.6 Berat Terendam Pipa

Berat pipa yang tercelup di bawah air akan memiliki berat yang berbeda dibandingkan saat di daratan. Berat pipa yang berada dibawah air akan lebih ringan dibandingkan dengan di daratan karena adanya gaya *buoyancy* (gaya apung). Persamaan untuk menghitung berat terendam pipa ditampilkan pada Persamaan 2.18 berikut :

$$W_{sub} = (m_{st} + m_{cc} + m_c + m_{wc}).g - F_b \dots \dots \dots (2.18)$$

Dimana,

$$F_b = \text{Gaya Apung (Buoyancy)} \quad (\text{N/m})$$

Gaya apung dijelaskan pada Persamaan 2.19 dan 2.20 berikut :

$$F_b = m_{disp} \cdot g \dots \dots \dots (2.19)$$

$$m_{disp} = \frac{\pi}{4} D_t^2 \cdot \rho_w \dots \dots \dots (2.20)$$

dimana,

$$m_{disp} = \text{Massa air yang dipindahkan} \quad (\text{kg/m})$$

2.2.7 Beban Lingkungan

Beban ini bekerja pada pipa akibat adanya kondisi lingkungan yang terjadi. Untuk beban pada pipa bawah laut, tentunya yang mempengaruhi adalah beban gelombang dan beban arus. Untuk mendapatkan data beban lingkungan yang tentunya bersifat acak, maka data yang digunakan untuk analisis adalah data periode ulang (*return period*). Periode ulang merupakan data rata – rata beban yang terjadi.

2.2.7.1. Gelombang

Perhitungan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada suatu struktur lepas pantai ataupun pipa bawah laut belum dapat dihitung secara eksak, baik dengan penurunan secara percobaan maupun teoritis. Oleh karena itu, digunakan metode penyederhanaan untuk mendekati perhitungan gaya hidrodinamik pada struktur laut tersebut. Pada kasus suatu gaya hidrodinamika mengenai suatu struktur pipa bawah laut, maka diasumsikan diameter terluar dari pipa tersebut masih jauh lebih kecil dari panjang gelombang laut, sehingga gelombang tersebut melewati struktur tanpa gangguan yang berarti. Gelombang yang bergerak melewati struktur

tersebut tidak terganggu, akan tetapi pengaruh terhadap struktur terjadi akibat adanya *vortex (wake formation)* yang terbentuk di belakang struktur dan *flow separation*.

Untuk gelombang acak kurun waktu pendek (*short term wave condition*) dapat dijelaskan menggunakan spectra gelombang. Menurut DNV RP F105 (2017), spektra yang sesuai digunakan untuk menjelaskan gelombang acak adalah spectra JONSWAP. JONSWAP sendiri merupakan singkatan dari *Joint North Sea Wave Project*, yaitu proyek yang dilakukan secara bersama – sama oleh sejumlah negara untuk melakukan penelitian gelombang di perairan utara. Spektra JONSWAP cukup cocok digunakan di Indonesia karena perairan Indonesia termasuk perairan tertutup atau kepulauan. Berikut Persamaan 2.21 mengenai spektra JONSWAP.

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \quad (2.21)$$

Dimana,

$S_{\eta\eta}$ = Spektra Gelombang

α = Konstanta *Generalized Phillips*

ω = Frekuensi Gelombang (rad/s)

γ = *Peak-enhancement factor*

ω_p = Frekuensi puncak gelombang (rad/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

σ = Parameter lebar spektra

Persamaan 2.22 mengenai konstanta *Generalized Phillips* yaitu,

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma) \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana,

H_s = Tinggi gelombang signifikan (m)

Parameter lebar spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases} \dots \dots \dots (2.23)$$

Peak-enhancement factor yang digunakan yaitu:

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi < 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi), & 3,6 < \varphi < 5,0; \varphi = \frac{Tp}{\sqrt{Hs}} \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases} \dots\dots\dots (2.24)$$

Setelah itu, spektrum kecepatan yang diinduksi gelombang (*wave induced velocity spectrum*) di *seabed* $S_{UU}(\omega)$ bisa ditentukan melalui transformasi spektra gelombang pada permukaan laut menggunakan teori gelombang orde pertama ditampilkan pada Persamaan 2.25:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana,

G = *Transfer Function*

$S_{\eta\eta}$ = Spektrum JONSWAP

Fungsi transfer G mentransformasi elevasi permukaan laut menjadi kecepatan aliran yang diinduksi gelombang di dasar laut, yakni pada Persamaan 2.26 berikut ini:

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cosh(k \cdot (D+e))}{\sinh(k \cdot d)} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana, d dan k diiterasi dari persamaan transcendental sebagai berikut:

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d) \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana,

ω = Frekuensi gelombang (rad/s)

g = percepatan gravitasi (9,81) (m/s²)

k = Angka gelombang

d = kedalaman perairan (m)

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada elevasi pipa (U_s) dan mean zero-up crossing dari osilasi aliran pipa (T_u) dijelaskan pada Persamaan 2.28 dan 2.29

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana,

M_0 = Momen spektra orde pertama

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \dots \dots \dots (2.29)$$

Dimana

M_2 = Momen spektra orde ke-2

M_0 dan M_2 dapat ditentukan dengan mengintegrasikan persamaan momen spektra pada orde ke-n:

$$M_n = \int_0^\infty \omega_n^2 S_{UU}(\omega) d(\omega) \dots \dots \dots (2.30)$$

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada elevasi pipa akan mengalami penurunan karena pengaruh arah dan sebaran gelombang. Persamaan kecepatan aliran gelombang normal pada pipa dan pengaruh sebaran gelombang adalah sebagai berikut:

$$U_w = U_s \cdot R_D \dots \dots \dots (2.31)$$

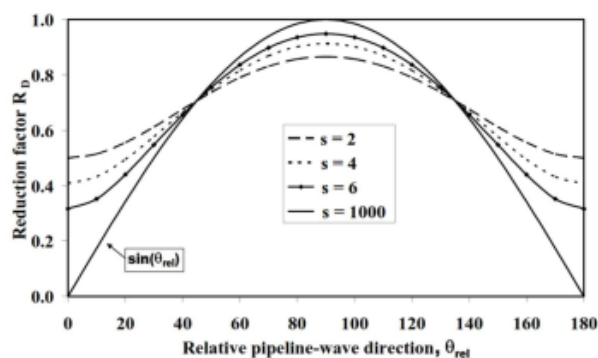
Dimana:

U_w = Kecepatan aliran gelombang normal pada pipa (m/s)

U_s = Kecepatan arus akibat gelombang (m/s)

R_D = Reduction factor, akibat efek arah dan sebaran gelombang.

Nilai R_D dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Reduction Factor Akibat Gelombang (DNV GL RP F105, 2017)

2.2.7.2. Arus

Beban arus yang terdiri dari data kecepatan dan arah arus didapat dari pengukuran di laut. Pengukuran pada suatu rute pipa bawah laut dibagi menjadi beberapa zona pengukuran. Dengan memperhitungkan efek *boundary layer*, maka alat pengukur (*current meter probe*) diletakkan pada suatu elevasi referensi. Data arus yang diperoleh bersifat diskrit, per detik, per menit atau per jam. Dari data diskrit ini lalu dilakukan analisis spektrum kecepatan dan diambil rata – ratanya. Asumsi yang digunakan adalah arus dianggap *steady current*, yang terdiri dari :

1. Arus pasang surut
2. *Wind induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.
3. *Storm surge induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.
4. *Density driven current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.

Untuk perairan dengan kedalaman lebih dari 100 m, arus memiliki dua karakteristik berbeda, sebagai *driving agent* dan *steering agent*. *Driving agent* adalah arus pasang surut, dimana gradien tekanan disebabkan oleh elevasi permukaan atau perubahan tekanan, angin dan gaya *storm surge*. *Steering agent* adalah arus yang terjadi karena pengaruh topografi dan gaya rotasi bumi. Selain itu, jenis aliran arus dibagi menjadi dua zona, yaitu:

a. *Outer zone*

Merupakan zona aliran yang terjadi pada elevasi yang jauh dari dasar laut, dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran hanya sedikit bervariasi dalam arah horizontal. *Outer zone* ini terletak pada suatu bentuk *seabed* yang membentuk suatu puncak atau lebih tinggi dari lembah *seabed*. Pada suatu *seabed* yang rata/flat, *outer zone* diasumsikan terletak pada ketinggian $3600 z_0$ dari *seabed*. Nilai z_0 dilihat pada Tabel 2.1.

b. *Inner zone*

Merupakan zona aliran dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran menunjukkan variasi secara signifikan dalam arah horizontal. Kecepatan dan arah arus adalah fungsi dari geometri lokal dasar laut. Pada *inner zone*, profil kecepatan arus dianggap logaritmik karena tidak terjadi pemisahan aliran. Di dalam DNV RP F105, kecepatan arus pada level pipa dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.32 berikut :

$$U_c = R_c \cdot U(z_r) \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \dots \dots \dots (2.32)$$

Dimana,

U_c = Kecepatan arus pada level pipa (m/s)

$U(z_r)$ = Kecepatan arus pada ketinggian referensi (m/s)

R_c = Faktor reduksi kecepatan arus

$$R_c = \sin(\theta_{rel}) \dots \dots \dots (2.33)$$

(θ_{rel}) = sudut datang aliran arus terhadap pipa

z = Elevasi diatas dasar laut (m)

$$z = e + \frac{Dt}{2} \dots \dots \dots (2.34)$$

z_r = Elevasi refrensi (m)

z_0 = Parameter kekasaran bawah laut (untuk nilai parameter sesuai DNV RP F105, ditampilkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 *Seabed Roughness Parameter* (DNV GL RP F105, 2017)

Seabed	Roughness z_0 (m)
Silt	$\approx 5 \times 10^{-6}$
Fine sand	$\approx 1 \times 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \times 10^{-5}$
Coarse sand	$\approx 1 \times 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \times 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \times 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \times 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \times 10^{-2}$

2.2.8 Kriteria *Current Flow Ratio*

Dengan telah diketahuinya besar kecepatan arus dan partikel gelombang. Maka besar kecepatan arus total tersebut harus diklasifikasikan untuk pengambilan analisis selanjutnya. Dasar dari pembagian kriteria ini adalah rasio antara kecepatan arus dan kecepatan partikel gelombang yaitu sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{U_c}{U_w + U} \dots \dots \dots (2.35)$$

Dimana:

U_c : Kecepatan arus (m/s)

U_w : Kecepatan Gelombang (m/s)

Rasio dari kecepatan arus dan kecepatan partikel ini merupakan faktor yang menentukan dampak aliran arus terhadap pipa. Adanya aliran yang melewati pipa menyebabkan pipa memiliki respon, dalam arah *inline* (searah arus) dan arah *cross-flow* (tegak lurus vertikal arah arus). Tabel kriteria respon dan dampak terhadap pipa berdasarkan rasio kecepatan arus dan gelombang ditampilkan Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran Arus (DNVGL-RP F105, 2017)

$\alpha < 0.5$	Gelombang Dominan ($U_w > U_c$)
	<u>Arah In-Line:</u> Pembebanan arah <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison. <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex shedding</i> diabaikan.
	<u>Arah Cross-Flow:</u> Beban arah <i>cross-flow</i> dominan disebabkan oleh <i>vortex shedding</i>
$0.5 < \alpha < 0.8$	Gelombang Dominan ($U_w < U_c$)
	<u>Arah In-Line:</u> Pembebanan arah <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison. <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex shedding</i> berkurang dengan keberadaan gelombang.
	<u>Arah Cross-Flow:</u> Beban <i>Cross-flow</i> dominan disebabkan oleh <i>vortex shedding</i> asimetris dan menunjukkan situasi arus yang dominan.
$\alpha > 0.8$	Arah Dominan ($U_c \gg U_w$)
	<u>Arah In-Line:</u> Pembebanan <i>In-line</i> berdasarkan <i>steady drag component</i> dan <i>oscillatory component</i> akibat <i>vortex shedding</i> Pembebanan <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison diabaikan.
	<u>Arah Cross-Flow:</u> Pembebanan arah <i>cross-flow</i> secara siklik akibat <i>vortex shedding</i> , dan menunjukkan situasi arus murni yang dominan.

2.2.9 Gaya Hidrodinamis

Pipa bawah laut yang terletak di dasar laut akan terkena gaya hidrodinamis yang muncul akibat aksi gelombang dan arus laut. Variasi gaya yang terjadi cukup kompleks. Persamaan analitis sederhana hanya dapat menjelaskan pendekatan persamaan gaya yang terjadi pada pipa (Braestrup dkk, 2005). Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa di dasar laut terdiri dari gaya *drag*, gaya inersia dan gaya *lift* (angkat).

2.2.9.1 Gaya Drag

Gaya *drag* adalah gaya yang berkaitan dengan kecepatan akibat arus *steady* yang dibangkitkan oleh gelombang. Kecepatan arus total (kecepatan arus akibat gelombang dan kecepatan arus pada elevasi pipa) mempengaruhi nilai dari gaya drag. Besar gaya *drag* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 2.36:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_D \cdot (U_w + U_c)^2 \dots\dots\dots(2.36)$$

Dimana,

F_D	= gaya <i>drag</i>	(N/m)
C_D	= koefisien <i>drag</i>	(persamaan 2.33)
U_w	= kecepatan partikel air akibat gelombang	(m/s ²)
U_c	= kecepatan arus laut	(m/s ²)
ρ_w	= Massa jenis air laut	(kg/m ³)
D_t	= Diameter total pipa (<i>coating</i>)	(kg/m ³)

Koefisien *drag* di dalam DNVGL RP F105 (2017) ditentukan dengan Persamaan 2.37 sebagai berikut:

$$C_D = C_D^0(k/Dt) \cdot \Psi_{KC,\alpha}^{CD} \Psi_{proxi}^{CD} \Psi_{trench}^{CD} \Psi_{VIV}^{CD} \dots\dots\dots(2.37)$$

Setiap parameter koefisien *drag* diatas dijelaskan sebagai berikut :

a. Koefisien Drag Dasar untuk Aliran Steady ($C_D^0(k/Dt)$)

Koefisien *drag* dasar merupakan fungsi kekasaran permukaan pipa k/Dt .

Ketentuan koefisien *drag* dasar dijelaskan pada Persamaan 2.38:

$$C_D^0\left(\frac{k}{Dt}\right) = \begin{cases} 0,65 & ; \frac{k}{Dt} < 10^{-4} (smooth) \\ 0,65\left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10}\left(\frac{k}{Dt}\right)\right) & ; 10^{-4} < \frac{k}{Dt} < 0 \\ 1,05 & ; \frac{k}{Dt} < 10^{-2} (rough) \end{cases} \quad (2.38)$$

k = kekasaran permukaan pipa (m) (Tabel 2.3)

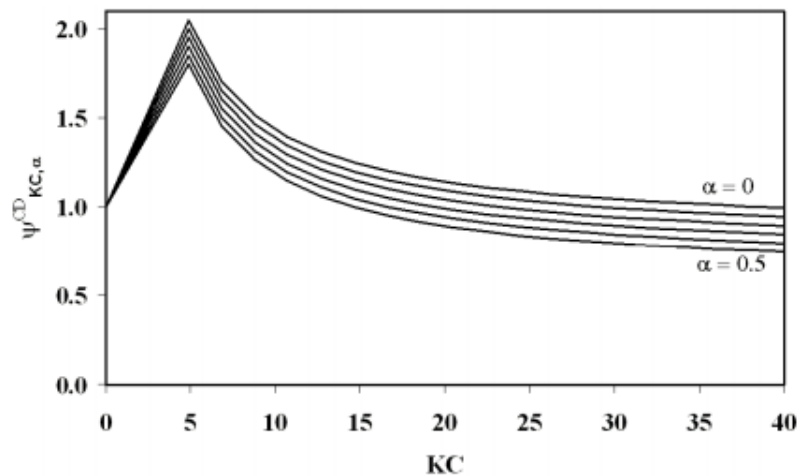
Tabel 2.3 Kekasaran Permukaan Pipa

Permukaan Pipa	k (meter)
<i>Steel, surface</i>	10^{-6}
<i>Steel, un-coated</i>	10^{-5}
<i>Concrete</i>	$1/300$
<i>Marine Growth</i>	$1/200 \rightarrow 1/20$

b. Faktor Koreksi untuk Aliran *Unsteady* ($\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$)

Faktor koreksi ini digunakan untuk mempertimbangkan efek *unsteadiness* dari aliran fluida, termasuk efek bilangan *Keulegan Carpenter* dan rasio aliran arus. Ketentuan ($\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$) dijelaskan pada Persamaan 2.39 dan Gambar 2.5 berikut:

$$\Psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0,85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & ; \alpha \leq 0.5 \\ 0,6 + \frac{6}{KC} & ; \alpha \leq 0.5 \end{cases} \quad 5 < KC < 4 \dots (2.39)$$



Gambar 2.5 Grafik $\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$ untuk $KC < 5$ (DNV GL RP F105, 2017)

Dimana,

KC = Keulegan Carpenter Number

Untuk $KC > 40$, komponen $6/KC$ pada persamaan diatas harus disubstitusikan dengan 0.15. Beban *drag* seringkali diperhitungkan dalam hal ini untuk nilai KC kecil dan dapat diinterpolasikan untuk melengkapi $KC < 5$.

c. Faktor Koreksi Perkiraan Dasar Laut

Ketentuan faktor koreksi perkiraan dasar laut dijelaskan pada Persamaan 2.40

$$\psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0,9 + \frac{0,5}{1+5\frac{e}{Dt}} - \frac{\alpha}{2} & ; \text{untuk } \frac{e}{Dt} \leq 0.8 \\ 1 & ; \text{Lainnya} \end{cases} \dots(2.40)$$

d. Faktor Koreksi Akibat Pengaruh Trench

Ketentuan faktor koreksi akibat trench dijelaskan pada persamaan 2.41:

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\Delta}{Dt} \dots(2.41)$$

e. Faktor Amplifikasi Akibat Getaran Cross-Flow

Merupakan faktor tambahan karena pipa mengalami getaran crossflow. Ketentuan amplifikasi akibat getaran *cross-flow* dijelaskan pada Persamaan 2.42:

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 (\sqrt{2} \frac{Az}{Dt} \dots(2.42)$$

2.2.9.2 Gaya Inersia

Pipa bawah laut yang berinteraksi dengan fluida yang dipercepat akan mengalami gaya yang proporsional dengan percepatan dari fluida tersebut (Bai, 2014). Beban siklis akibat gelombang akan mengurangi atau menambah kecepatan air. Pipa akan memberikan gaya untuk menolah perubahan kecepatan partikel air yang bekerja pada pipa. Besar gaya inersia dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.43:

$$F_I = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_M \cdot a_n \dots(2.43)$$

Dimana,

F_I	= Gaya Inersia	(N/m)
ρ_w	= Massa jenis air laut	(kg/m ³)
C_M	= Koefisien gaya inersia	(C _a +1)
a_n	= percepatan partikel air	(m/s ²)

2.2.8.3 Gaya Lift

Gaya Lift atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Ketika kecepatan aliran air di atas pipa lebih cepat dibandingkan kecepatan aliran air di bawah pipa, tekanan aliran yang muncul di atas pipa akan lebih kecil di bandingkan tekanan aliran di bawah pipa. Perbedaan tekanan ini akan mengakibatkan pipa terangkat. Besar gaya angkat dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.44:

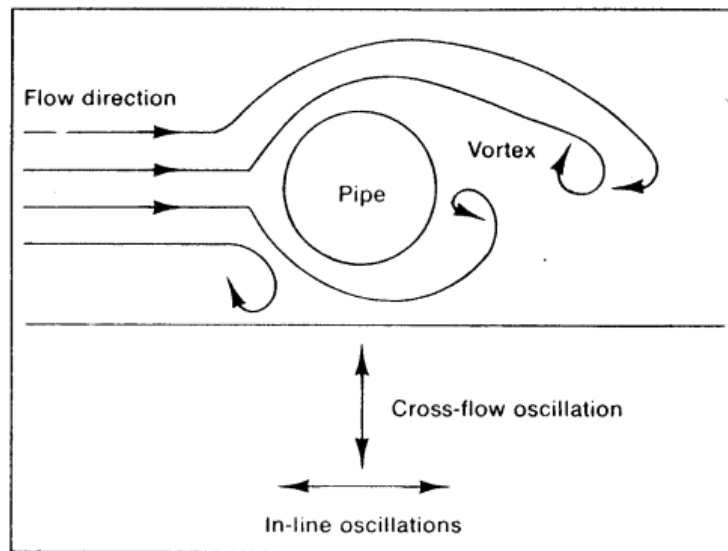
$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_L \cdot (U_w + U_c)^2 \dots \dots \dots (2.44)$$

Dimana,

F_L	= Gaya Lift	(N/m)
ρ_w	= Massa jenis air laut	(kg/m ³)
C_L	= Koefisien gaya lift	
U_w	= kecepatan partikel air akibat gelombang	(m/s ²)
U_c	= kecepatan arus laut	(m/s ²)
D_t	= Diameter total pipa (dengan <i>coating</i>)	(kg/m ³)

2.2.10 Vortex Induced Vibration (VIV)

Ketika partikel air mengalir melalui pipa bawah laut, *vortices* (pusaran) akan terbentuk di daerah pipa (Gambar 2.6). Pusaran ini terbentuk karena turbulensi dan ketidakstabilan aliran di belakang pipa. Pelepasan pusaran (*vortex shedding*) ini perubahan terhadap tekanan hidrodinamis pada pipa secara periodik. Perubahan tekanan hidrodinamis ini dapat menyebabkan pipa bergetar, terutama pipa yang mengalami bentangan bebas (Mouselli, 1981). Berikut permodelan *vortex induced vibration* ditampilkan pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Ilustrasi *Vortex Induced Vibration* pada Pipa (Mouselli, 1981)

VIV dari *freespans* tidak diperbolehkan terjadi selama masa desain *pipeline*. Dalam beberapa tahun terakhir pendekatan perhitungan VIV yang mempengaruhi *freespan* menjadi diterima dengan beberapa kriteria yang telah ditentukan, di mana parameter VIV yang diizinkan terbukti tidak menyebabkan kelelahan.

Berdasarkan (Bai and Bai, 2005), bahwa kriteria VIV adalah sebagai berikut:

- Onset *in-line* VIV diperbolehkan pada setiap fase dari *design life* asalkan menunjukkan bahwa tegangan yang diijinkan dan kerusakan *fatigue* yang diijinkan tidak terlampaui.
- Onset *cross-flow* VIV diperbolehkan pada setiap fase dari *design life* asalkan menunjukkan bahwa tegangan yang diijinkan dan kelelahan yang diperbolehkan tidak terlampaui.

2.2.10.1 Frekuensi *Vortex Shedding*

Frekuensi *vortex shedding* sangat berhubungan dengan diameter pipa dan kecepatan aliran. Jika frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi natural bentangan bebas pipa, maka resonansi akan terjadi dan pipa mengalami getaran. Pipa dapat mengalami kegagalan akibat *vortex*

induced vibration. Kegagalan pipa ini dapat dicegah jika frekuensi *vortex shedding* memiliki perbedaan cukup besar dengan frekuensi natural pipa (Mouselli, 1981). Persamaan frekuensi *vortex shedding* adalah sebagai berikut:

$$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right) \dots \dots \dots (2.45)$$

Dimana,

S_t = Strouhal Number (0.2 untuk silinder bulat)

U_{tot} = kecepatan partikel air total ($U_w + U_c$)

2.2.10.2 Reynolds Number

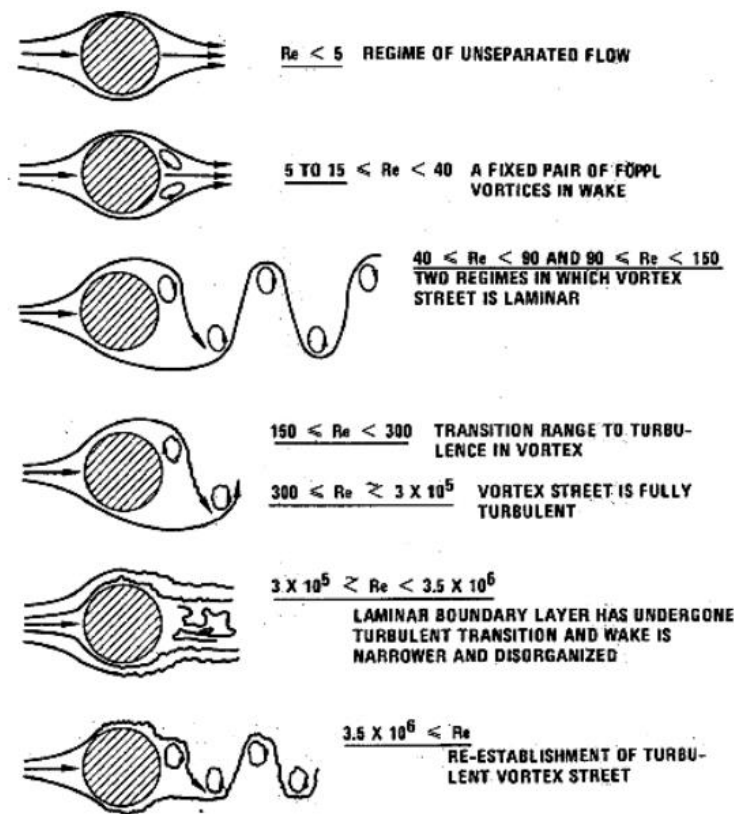
Persamaan *reynold number* adalah sebagai berikut :

$$R_e = \left(\frac{U_{tot} \cdot D_t}{\nu} \right) \dots \dots \dots (2.46)$$

Dimana,

ν = Viskositas kinematis air laut ($9,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

Bentuk-bentuk aliran fluida berbeda-beda untuk setiap *range* harga *Reynolds Number* yang berbeda. Hal ini dapat digunakan untuk mengetahui kondisi aliran di daerah tersebut seperti dijelaskan oleh Gambar 2.7



Gambar 2.7 Regime Aliran Fluida Pada Silinder Halus (Lienhard, 1966 dalam Techet, 2005)

Berdasarkan Gambar 2.7 dapat diketahui fenomena terbentuknya *vortex* di belakang silinder yaitu:

- Nilai *reynolds number* untuk $Re < 5$, aliran yang melewati silinder belum terbentuk aliran *vortex*.
- Nilai *reynolds number* untuk $5-15 < Re < 40$, aliran yang melewati silinder akan terbentuk *foppl vortices* dibagian belakang aliran silinder.
- Nilai *reynolds number* untuk $40 < Re < 90$ dan $90 < Re < 150$, terbentuk dua daerah pembentuk aliran *vortex* pada bagian sisi kanan dan kiri dari silinder dimana sifat dari *vortex* yang terbentuk adalah laminar
- Nilai *reynolds number* untuk $150 < Re < 300$, *vortex shedding* akan mengalami transisi ke bentuk yang lebih tidak teratur. Pada

harga *reynolds number* tersebut aliran akan tampak menjadi *turbulent*.

- Nilai *reynolds number* untuk $300 < R_e < 3.10^5$ dan $3.10^5 < R_e < 3.10^6$ *laminar boundary condition* membentuk atau memisahkan aliran. Sehingga terlihat aliran sepenuhnya menjadi *turbulent* dan tidak teratur.
- Nilai *reynolds number* untuk $< R_e > 3.10^6$ aliran *vortex* yang terjadi pada belakang silinder akan menjadi banyak dan semakin tidak teratur.

2.2.10.3 Stability Parameter

Sumer dan Fredsoe (1994) di dalam Choi (2000) menjelaskan bahwa *Stability parameter* menentukan keunikan amplitudo getaran maksimum. Persamaan *Stability parameter* adalah sebagai berikut:

$$K_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot m_e \cdot \zeta_T}{\rho_w \cdot D t^2} \dots \dots \dots (2.47)$$

Dimana,

m_e = massa efektif pipa (kg/m)

ζ_T = Total modal *damping ratio*

Di dalam DNV GL RP F105 (2017) total modal *damping ratio* terdiri dari:

- Structural Damping (ζ_{str}), merupakan *damping* yang diakibatkan oleh gaya gesekan internal material pipa. Jika tidak tersedia data yang detail, *structural damping* dapat diasumsikan sebesar 0.05. Jika terdapat concrete, maka geser pada permukaan selimut beton dan *corrossion coating* dapat meningkatkan *damping* menjadi 0.01-0.02
- Hydrodynamic Damping (ζ_h) untuk VIV yang terletak di daerah *lockin* nilainya dapat dianggap 0
- Soil damping (ζ_{soil}), untuk tujuan screening bernilai 0.01
- Di dalam DNV RP F105, *stability parameter* ini dibagi dengan *safety factor* untuk meningkatkan keamanan.

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k} \dots \dots \dots (2.48)$$

2.2.10.4 Reduced Velocity

Parameter *reduced velocity* adalah besaran non dimensional yang dihitung untuk menentukan eksistensi *vortex shedding*. Dari harga *reduced velocity* maka dapat diketahui tipe gerakan disekitar aliran yaitu *in-line* atau *cross-flow*. *In-line* atau *cross-flow response* terjadi apabila harga *reduced velocity*-nya memenuhi batasan sebagai berikut:

- *In-line response* terjadi apabila harga V_R pada $1.0 > V_R > 2.2$
- *Cross-flow response* terjadi apabila harga V_R pada $V_R > 2.2$

Reduced velocity merupakan kecepatan aliran partikel air dimana getaran pada pipa akibat *vortex shedding* terjadi (Guo dkk, 2014). Persamaan *reduced velocity* adalah sebagai berikut:

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n \cdot D_t} \dots \dots \dots (2.49)$$

Dimana,

U_c = Kecepatan normal arus pada pipa (m/s)

U_w = Kecepatan aliran gelombang signifikan yang mengenai pipa (m/s)

f_n = frekuensi n-th eigen gelombang pada pipa (Hertz)

D_t = Diameter total pipa (dengan *coating*) (kg/m^3)

2.2.10.5 Keulegan-Carpenter Number

Perhitungan *Keulegan-Carpenter Number*, ditunjukkan dalam Persamaan 2.50

$$KC = \frac{U_w}{f_w \cdot D_t} \dots \dots \dots (2.50)$$

Dimana,

f_w = frekuensi gelombang signifikan (1/Tu)

2.2.10.6 Current Flow Ratio

Perhitungan rasio aliran arus, ditunjukkan dalam Persamaan 2.51

$$\alpha = \frac{U_{c100 \text{ tahun}}}{U_{c100 \text{ tahun}} \cdot U_{w1 \text{ tahun}}} \dots \dots \dots (2.51)$$

Dimana,

$U_{c100 \text{ tahun}}$ = Kecepatan arus 100 tahun rata-rata pada pipa

$U_{w1tahun}$ = Kecepatan aliran gelombang signifikan pada pipa

Semakin tinggi nilai KC , *regime* aliran pada akhirnya akan menyerupai kondisi arus murni. Dalam DNVGL RP F105, jika $KC > 40$, aliran harus dianggap sebagai arus dominan terlepas dari komponen arus aktual. Dalam perhitungan model respons, ini dapat diasumsikan $\alpha = 1$, ketika $KC > 40$. Asumsi ini tidak boleh digunakan dalam perhitungan gelombang langsung, di mana kecepatan aliran arus yang benar harus diterapkan tanpa memperhatikan *regime* KC .

2.2.11 Safety Factor

Safety factor merupakan faktor yang digunakan untuk meningkatkan keamanan suatu parameter analisis. *Safety factor* memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung pada kondisi pada suatu parameter analisis. Nilai *safety factor* untuk setiap parameter analisis terdapat didalam DNVGL RP F105 dijelaskan di dalam Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 berikut:

Tabel 2.4 *Safety factor* untuk kriteria *screening* (DNV-GL RP F105, 2017)

γ_{IL}	1,2
γ_{CF}	1,1

Tabel 2.5 *Safety factor* untuk Parameter VIV (DNVGL RP F105, 2017)

<i>Safety factor</i>	<i>Safety Class</i>		
	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
η	1,0	0,5	0,25
γ_k	1,0	1,15	1,30
γ_s	1,3		
$\gamma_{on,IL}$	1,1		
$\gamma_{on,CF}$	1,2		

2.2.12 Dynamic Soil Stiffness

Dynamic soil stiffness muncul akibat adanya interaksi pipa bawah laut dengan tanah di lokasi pipa. *Dynamic soil stiffness* muncul di dua arah interaksi pipa yaitu arah vertikal dan horizontal. *Dynamic soil stiffness* vertikal merupakan kekakuan tanah yang dipengaruhi gaya vertikal dinamis antara pipa dan tanah per satuan panjang pipa dan *displacement* vertikal pipa. Sedangkan *Dynamic soil stiffness* horizontal merupakan kekakuan tanah yang dipengaruhi gaya horizontal dinamis antara pipa dan tanah per satuan panjang pipa dan *displacement* horizontal pipa.

Jika kondisi topologi di daerah pipa tidak kompleks dan tanah bersifat homogen, nilai *dynamic soil stiffness* dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.52 dan 2.53 sesuai persamaan yang tertera pada DNVGL RP F105 berikut :

- **Vertikal**

$$K_v = \frac{C_v}{1-v_{soil}} \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{Dt} \dots \dots \dots (2.52)$$

Dimana,

K_v = *Dynamic soil stiffness* vertical (kN/m/m)

C_v = Koefisien *Dynamic soil stiffness* vertical ($\text{kN/m}^{\frac{5}{2}}$)

$\frac{\rho_s}{\rho}$ = Rasio massa spesifik antara massa pipa (tanpa massa tambah) dan massa air yang dipindahkan

- **Horizontal**

$$K_L = C_L (1 + v_{soil}) \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{Dt} \dots \dots \dots (2.52)$$

Dimana,

K_L = *Dynamic soil stiffness* horizontal (kN/m/m)

C_L = Koefisien *Dynamic soil stiffness* horizontal ($\text{kN/m}^{\frac{5}{2}}$)

$\frac{\rho_s}{\rho}$ = Rasio massa spesifik antara massa pipa (tanpa massa tambah) dan massa air yang dipindahkan

2.2.12.1 Koefisien *Dynamic Soil Stiffness*

Koefisien *dynamic soil stiffness* ditentukan di dalam DNV GL RP F105 untuk setiap jenis tanah. Pada tugas akhir ini, jenis tanah di lokasi pipa merupakan *fine to lose sand* sehingga koefisien yang digunakan dijelaskan pada Tabel 2.6 berikut :

Tabel 2.6 Koefisien *Dynamic Soil Stiffness* untuk Tanah Jenis *Sand* (DNV GL RP F105, 2017)

<i>Sand Type</i>	C_v (kN/m ²)	C_L (kN/m ²)	$K_{V,S}$ (kN/m/m)
<i>Loose</i>	16000	12000	250
<i>Medium</i>	22000	16500	530
<i>Dense</i>	32000	24000	1350

Faktor kekakuan dinamis dan statis dari interaksi antara pipa dengan tanah tersebut mempengaruhi panjang span efektif pipa dan frekuensi natural.

2.2.12.2 *Poisson Ratio* Tanah

Poisson ratio dari tanah di dalam DNV RP F105 ditentukan untuk setiap jenis tanah. *Poisson ratio* untuk jenis tanah *sand* dijelaskan pada Tabel 2.7 berikut:

Tabel 2.7 Koefisien *Poisson Ratio* untuk Tanah Jenis *Sand* (DNV GL RP F105, 2017)

<i>Soil Type</i>	ϑ_s	γ'_{soil} (kN/m ³)	ν	e_s
<i>Loose</i>	28 -30°	8.5-11.0	0,35	0.7-0.9
<i>Medium</i>	30 -36°	9.0-12.5	0,35	0.5-0.8
<i>Dense</i>	36 -41°	10.00-13.5	0,35	0.4-0.6

2.2.13 Frekuensi Natural Pipa

Sebuah benda memiliki frekuensi natural yang merupakan jumlah getaran alami sebuah benda yang dihasilkan tiap detik. Walaupun benda tidak diberikan pemicu untuk bergetar (gaya luar), benda tersebut akan senantiasa bergetar tetapi tidak dalam nilai yang besar. Setiap struktur memiliki frekuensi natural yang berbeda tergantung dari massa dan kekakuannya. Craig (1981) menjelaskan bahwa frekuensi natural sebuah struktur dapat ditentukan dengan mengabaikan pemicu dari gaya luar dan redaman dari struktur (*Undamped Free Vibration*). Frekuensi natural di dalam DNV-GL RP F105 (2017) dijelaskan di dalam persamaan *fundamental natural frequency* pada Persamaan 2.54:

$$f_1 = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{E_{st} I_{st}}{m_e L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t}\right)^2\right)} \dots \dots \dots (2.54)$$

Dimana,

f_1 = *fundamental natural frequency* (Hz)

C_1, C_3 = *boundary condition coefficient*

CSF = *concrete stiffness factor*

E_{st} = *Young's modulus pipa baja* (N/m²)

I_{st} = *Momen inersia pipa baja* (m⁴)

L_{eff} = *Panjang Freespan efektif* (m)

S_{eff} = *effective axial force* (N)

P_{cr} = *critical buckling load* (N)

δ = *static deflection* (m)

Setiap parameter pada persamaan frekuensi natural dasar, akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.

2.2.13.1 Effective Axial Force

Pada dasarnya, ketika sebuah pipa bawah laut memiliki suatu penampang tertentu, memiliki nilai momen inersia dan kelakuan, maka pipa bawah laut dapat dikategorikan sebagai balok secara umum. Akan tetapi, pada suatu *free span*, pipa mengalami regangan yang disebabkan oleh pemuaian material akibat temperatur *content*,

dan juga tekanan *content* tersebut. Oleh karena itu, pipa bawah laut memiliki karakteristik yang unik dalam analisis mekanika teknik, sehingga tidak dapat disebut balok. Sebuah *free span* akan mengalami regangan pada kedua ujungnya, sehingga disimpulkan ada gaya aksial yang bekerja padanya. Pada umumnya perpanjangan ini menjad suatu lendutan vertikal. Di dalam DNV RP F105, penentuan nilai *fundamental natural frequency* membutuhkan parameter *effective axial force* yang dijelaskan dalam Persamaan 2.55 berikut:

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2\nu) \cdot P_i \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot A_{st} \dots (2.55)$$

Dimana,

H_{eff}	= <i>Effective lay tension</i>	(N)
ν	= <i>Poisson ratio</i> baja	(0.3s)
P_i	= Perbedaan tekanan internal	(Pa)
D_i	= Diameter dalam pipa	(m)
α_e	= koefisien ekspansi suhu	($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	= Perbedaan temperatur	($^{\circ}\text{C}$)
A_{st}	= Luas penampang pipa baja	(m^2)

2.2.13.2 Critical Buckling Load

Critical buckling load dipengaruhi oleh kekakuan pipa, berat terendam pipa dan pengaruh kontak pipa dengan tanah (Bai dan Bai, 2014). Di dalam DNV GL RP F105, *critical buckling load* dapat ditentukan dengan Persamaan 2.56 berikut :

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2} \dots (2.56)$$

Dimana,

C_2	= <i>boundary condition coefficient</i>	
CSF	= <i>concrete stiffness factor</i>	
I_{st}	= Momen inersia pipa baja	(m^4)

2.2.13.3 Static Deflection

Bentangan bebas pipa akan mengalami lendutan atau defleksi di sepanjang bagian tengah pipa yang tidak ditumpu oleh tanah. Defleksi ini terjadi di arah *cross-flow* dan *in-line*. Defleksi untuk arah *cross-flow* disebabkan karena beban terendam pipa, sedangkan untuk arah *in-line* disebabkan karena beban hidrodinamis. Terjadinya defleksi dapat meningkatkan risiko kegagalan *buckling* pipa. Di dalam DNV RP F105, *static deflection* dijelaskan dalam Persamaan 2.57 berikut:

$$\delta = C_6 \pi^2 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{E_{st} I_{st} \cdot (1 + CSF)} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}})} \dots \dots \dots (2.57)$$

Dimana,

C_6 = boundary condition coefficient

q = deflection load unit per length (N/m)

P_{cr} = critical buckling load (N)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m⁴)

S_{eff} = effective axial force (N)

2.2.12.4 Concrete Stiffness Factor (CSF)

Fungsi penambahan selimut beton adalah untuk menambah berat pipa sehingga dapat meningkatkan kestabilan pipa di dasar laut. Selain itu, penambahan selimut beton dapat mempengaruhi kekakuan pipa. *Concrete stiffness factor* menunjukkan kekakuan selimut beton relatif terhadap kekakuan pipa baja. Persamaan CSF dijelaskan pada Persamaan 2.58 berikut:

$$CSF = k_c \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0,75} \dots \dots \dots (2.58)$$

Dimana,

k_c = konstanta empiris

= 0.33 untuk AE dan 0.25 untuk PP/PE *coating*

EI_{conc} = bending stiffness selimut beton

EI_{steel} = bending stiffness pipa baja

2.2.13.5 Boundary Condition

Untuk melakukan analisis *free span*, diharuskan untuk menentukan kondisi peletakan dari *free span* yang ditinjau. Dalam hal ini DNV GL RP F105 telah memberikan 3 macam kondisi peletakan sesuai dengan teori pembebanan. Berikut ini adalah keterangan penggunaan dari 3 kondisi peletakan.

- *Pinned-pinned*: Digunakan untuk *span* yang masing masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* & *cross-flow* terhadap arah aliran arus, tetapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
- *Fixed-fixed*: Digunakan untuk *span* yang masing – masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus, tetapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
- *Pinned-fixed*: Digunakan untuk *span* yang salah satu ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus serta rotasi terhadap sumbu pipanya, sedangkan ujung yang lain masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipanya.

Boundary condition coefficient (C1-C6) ditentukan dalam DNV GL RP F105 yang disajikan pada Tabel 2.8 berikut:

Tabel 2.8 Koefisien *Boundary condition* (DNV GL RP F-105, 2017)

	<i>Pinned-pinned</i> ⁽²⁾	<i>Fixed-fixed</i> ⁽³⁾	<i>Single Span on seabed</i>
C ₁	1.57	3.56	3.56
C ₂	1.0	4.0	4.0
C ₃	0.8 ⁽¹⁾	0.2 ⁽¹⁾	0.4 ⁽¹⁾
C ₄	4.93	14.1	<i>Shoulder</i> : $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ <i>Midspan</i> : 8.6
C ₅	1/8	1/12	<i>Shoulder</i> ⁽⁴⁾ : $14.1 (L/L_{eff})^2$ <i>Midspan</i> : 8.6
C ₆	5/384	1/384	1/384

Tabel 2.8 Koefisien *Boundary condition* lanjutan (DNV GL RP F-105)

- 1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line direction if the steady current is not accounted for.
- 2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} shall be replaced by L in all expressions, including the expression for P_{cr} .
- 3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition.
- 4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.

2.2.13.6 Panjang *Span* Efektif

Dalam analisa panjang bentangan bebas pipa bawah laut menggunakan DNV RP F105, digunakan parameter panjang bentangan bebas yaitu panjang bentangan bebas efektif. Panjang bentangan bebas efektif digunakan untuk mempertimbangkan efek tumpuan *fully fixed* pada bentangan bebas pipa. Persamaan panjang bentangan bebas efektif dijelaskan pada Persamaan 2.59 dan 2.60:

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{-0,066\beta^2 + 1,02\beta + 0,63} & , \text{ untuk } \beta \geq 2,7 \\ \frac{4,73}{0,036\beta^2 + 0,6\beta + 1,0} & , \text{ untuk } \beta < 2,7 \end{cases} \dots (2.59)$$

Dengan,

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1+CSF)E_{st}I_{st}} \right) \dots \dots \dots (2.60)$$

Dimana,

L_{eff} = Panjang *efektif span* (m)

L = Panjang aktual *free span* (m)

β = *Relative soil stiffness parameter*

K = *Relevant soil stiffness* (vertikal/ horisontal, statis/dinamis)

CSF = *Concrete stiffness factor*

E_{st} = *Young's modulus* pipa baja (N/m²)

I_{st} = Momen inersia pipa baja (m⁴)

2.2.14 *Response Model dan Screening Criteria Fatigue*

Screening fatigue yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini mengacu pada DNV GL RP F105. Kriteria *screening* adala meninjau terjadinya *fatigue* akibat VIV yang disebabkan oleh beban gelombang secara langsung dan kombinasi beban arus & gelombang secara bersamaan.

Kriteria *fatigue* ini telah dikalibrasikan dengan analisis *fatigue* lengkap untuk memastikan usia *fatigue* lebih dari 50 tahun.

2.2.14.1 In-Line Response Model

Respon in-line dari bentangan pipa yang didominasi oleh kondisi arus adalah berasosiasi dengan frekuensi vortex shedding. Kontribusi keduanya pada area ketidakstabilan pertama dan kedua dari kondisi in-line adalah termasuk pada response model tersebut. In-line response model digunakan pada semua mode getaran in-line

Respon amplitudo utamanya tergantung pada reduced velocity, stability parameter, turbulency intensity, sudut aliran relative pada pipa. In-Line VIV menyebabkan rentang tegangan dengan persamaan respon model 2.60.1 sebagai berikut:

$$S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_Y / D) \cdot \phi_{\alpha IL} \cdot \gamma_s \dots \dots \dots (2.60.1)$$

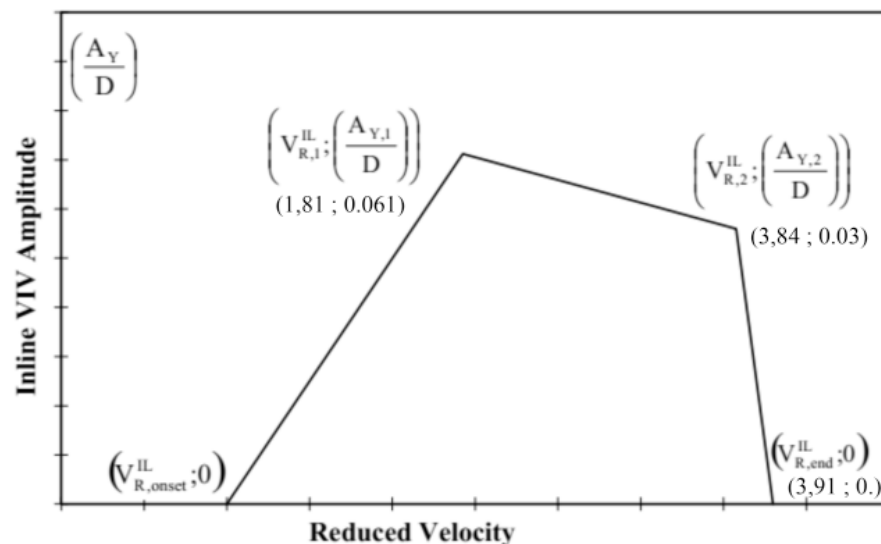
Dimana,

A_{IL} = Unit stress amplitude

$\psi_{\alpha, IL}$ = Faktor koreksi untuk current flow ratio α

γ_s = Safety factor

(A_Y/D) didefinisikan sebagai nilai in-line VIV amplitudo respon maksimum sebagai sebuah fungsi dari V_R dan K_S , Gambar 2.8 berikut mengilustrasikan hubungan A_Y/D dan V_R .



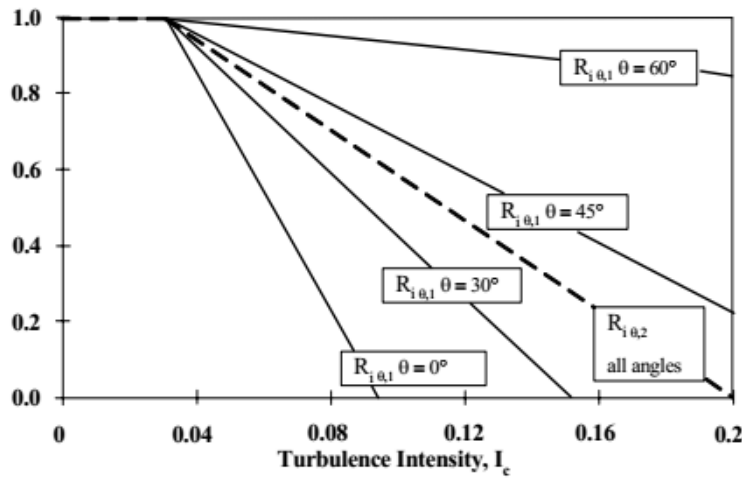
Gambar 2.8 Prinsip umum Respon Model In-Line

Faktor reduksi, $R_{I\theta,1}(I_c, \theta_{rel})$ dan $R_{I\theta,2}(I_c)$, dihitung untuk efek dari turbulence intensity dan angle of attack dari aliran. Persamaan 2.60.2 dan Persamaan 2.60.3 merupakan persamaan turbulence intensity aliran.

$$R_{I\theta,1} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2} \cdot \theta_{rel} \right) (I_c - 0.03) \quad 0 \leq R_{I\theta,1} \leq 1 \quad \dots\dots\dots(2.60.2)$$

$$R_{I\theta,2} = 1.0 - \frac{(I_c - 0.03)}{0.17} \quad 0 \leq R_{I\theta,2} \leq 1 \quad \dots\dots\dots(2.60.3)$$

Gambar 2.9 menampilkan grafik hubungan *turbulene intensity* dengan sudut datang gelombang.



Gambar 2.9 Grafik *turbulence intensity*

Kemudian, melakukan perhitungan parameter untuk mencari $V_{R,onset}^{IL}$, $V_{R,1}^{IL}$, $V_{R,2}^{IL}$, dan $V_{R,end}^{IL}$ dengan persamaan dibawah ini:

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1.0}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{for } K_{sd} < 0.4 \\ \left(\frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{for } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \left(\frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{for } K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2.60.4)$$

$$V_{R,1}^{IL} = 10 \cdot \left(\frac{A_{Y,1}}{D} \right) + V_{R,onset}^{IL} \quad \dots\dots\dots(2.60.5)$$

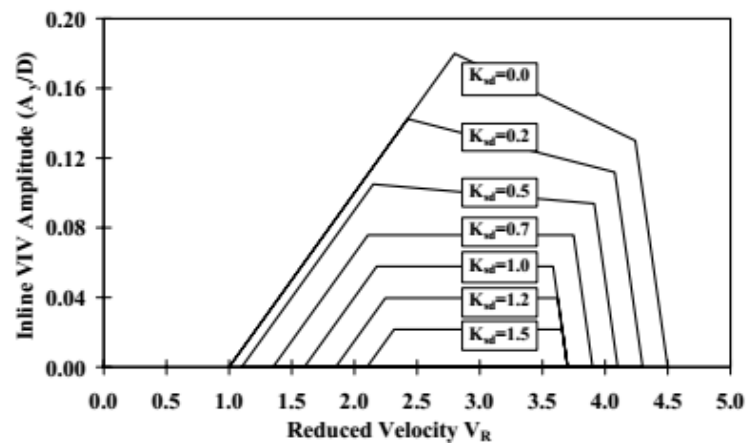
$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,end}^{IL} - 2 \cdot \left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right) \quad \dots\dots\dots(2.60.6)$$

$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4.5 - 0.8 K_{sd} & \text{for } K_{sd} < 1.0 \\ 3.7 & \text{for } K_{sd} \geq 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots(2.60.7)$$

$$\left(\frac{A_{Y,1}}{D} \right) = \max \left(0.18 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2} \right) \cdot R_{I\theta,1}; \left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right) \right) \dots\dots\dots(2.60.8)$$

$$\left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right) = 0.13 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.8} \right) \cdot R_{I\theta,2} \dots\dots\dots(2.60.9)$$

Sehingga didapatkan koordinat response model $\frac{A_y}{D}$ dari kondisi *In-line* dari Gambar 2.10 yang nanti akan menjadi parameter di perhitungan *stress range* pipa dinamis.



Gambar 2.10 Grafik hubungan antara *in-line VIV amplitude* dengan *Reduced Velocity*

Di dalam DNV GL RP F105 (2017), evaluasi bentangan bebas pipa bawah laut dijelaskan di dalam persamaan *screening criteria* berikut:

- Untuk arah *In-Line*, harus memenuhi Persamaan 2.61 sebagai berikut:

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250} \right) \cdot \frac{1}{\alpha} \dots\dots\dots(2.61)$$

Dimana,

$f_{n,IL}$ = Frekuensi natural *in-line*

γ_{IL} = *Safety Factor (in-line)*

$U_{c,100 \text{ tahun}}$ = Periode ulang arus 100 tahun (m/s)

$V_{R,onset}^{IL}$	= <i>In-line onset value</i>	
D_t	= Diameter total pipa	(m)
L	= Panjang <i>freespan</i> pipa	(m)
$\bar{\alpha}$	= <i>Current flow ratio</i>	

Untuk nilai *onset* arah *In-Line*, dijelaskan pada Persamaan 2.62 sebagai berikut:

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{untuk } K_{sd} < 0,4 \\ \left(\frac{0,6+K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & ; \text{untuk } K_{sd} \ 0,4 < K_{sd} < 1,6. (2.62) \\ \frac{2,2}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{untuk } K_{sd} > 1,6 \end{cases}$$

Dimana,

$\gamma_{on,IL}$ = *Safety Factor (in-line) value*

K_{sd} = *Stability Parameter/ γ_k (safety factor)*

2.2.14.1 Cross-Flow Response Model

Cross-flow VIV disebabkan oleh beberapa parameter seperti reduced velocity, Keulegan-Carpenter number, rasio current flow, stability parameter, rasio gap dasar laut, Strouhal number, kekasaran pipa dan lain-lain.

Untuk situasi aliran yang didominasi arus steady, onset dari cross-flow VIV untuk amplitudo signifikan terjadi secara tipikal pada nilai signifikan amplitudo VR antara 3.0 dan 4.0, dimana level getaran maksimum terjadi pada nilai terbesar Vr. Untuk pipa dengan massa spesifik rendah, yang situasi alirannya didominasi oleh gelombang atau scenario bentangan dengan rasio gap rendah, getaran cross-flow dimulai pada VR antara 2 dan 3.

Cross-flow VIV menyebabkan rentang tegangan oleh kombinasi antara arus dan aliran gelombang dengan persamaan sebagai berikut:

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_Z / D) \cdot R_k \cdot \gamma_s$$

Dimana,

A_{CF} = Unit stress amplitude

R_k = Amplitude reduction factor due to damping

γ_s = Safety factor

Respon amplitude sebagai fungsi dari current flow ratio dan KC dapat disusun sebagai berikut:

$$V_{R,1}^{CF} = 7 - \frac{(7 - V_{R,onset}^{CF})}{1.15} \cdot \left(1.3 - \frac{A_{Z,1}}{D}\right) \dots\dots\dots(2.61.1)$$

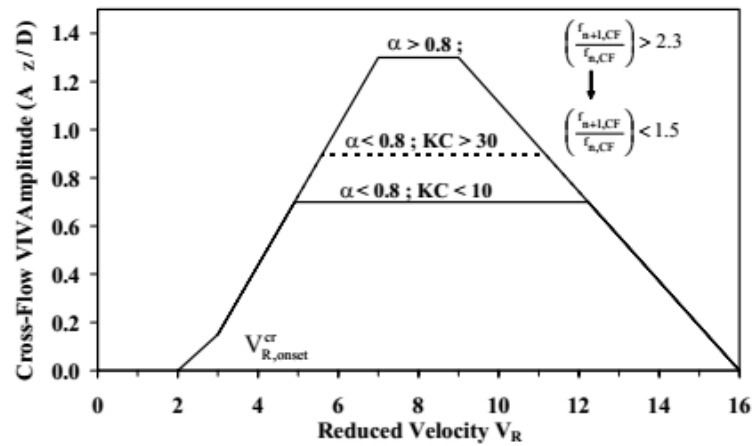
$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,end}^{CF} - \left(\frac{7}{1.3}\right) \cdot \left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right) \dots\dots\dots(2.61.2)$$

$$V_{R,end}^{CF} = 16 \dots\dots\dots(2.61.3)$$

$$\left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right) = \begin{cases} 0.9 & \alpha > 0.8 & \left(\frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}}\right) < 1.5 \\ 0.9 + 0.5 \cdot \left(\frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}} - 1.5\right) & \alpha > 0.8 & 1.5 \leq \left(\frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}}\right) \leq 2.3 \\ 1.3 & \alpha > 0.8 & \left(\frac{f_{n+1,CF}}{f_{n,CF}}\right) > 2.3 \\ 0.9 & \alpha \leq 0.8 & KC > 30 \\ 0.7 + 0.01 \cdot (KC - 10) & \alpha \leq 0.8 & 10 \leq KC \leq 30 \\ 0.7 & \alpha \leq 0.8 & KC < 10 \end{cases} \dots\dots(2.61.4)$$

$$\left(\frac{A_{Z,2}}{D}\right) = \left(\frac{A_{Z,1}}{D}\right) \dots\dots\dots(2.61.5)$$

The cross-flow VIV amplitude (A_z/D) dalam kombinasi arus dan aliran gelombang didapatkan dari Gambar 2.11 dibawah ini



Gambar 2.11 Prinsip Umum Response Amplitudo A_z/D

- Untuk arah *Cross-Flow*, harus memenuhi Persamaan 2.63 sebagai berikut:

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}} + U_{w,1 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t} \dots\dots\dots(2.63)$$

Dimana,

$f_{n,CF}$ = Frekuensi natural *cross-flow*

γ_{CF} = *Safety Factor (cross-flow)*

$U_{c,100 \text{ tahun}}$ = Periode ulang arus 100 tahun (m/s)

$U_{w,1 \text{ tahun}}$ = Periode ulang gelombang 1 tahun (m/s)

$V_{R,onset}^{CF}$ = *Cross-flow onset value*

D_t =Diameter total pipa (m)

Untuk nilai *onset* arah *Cross-flow*, dijelaskan pada Persamaan 2.64 sebagai berikut:

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \Psi_{proxi,onset} \cdot \Psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}} \dots\dots\dots(2.64)$$

Dimana,

$\gamma_{on,CF}$ = *Safety Factor (cross-flow) value*

$\Psi_{proxi,onset}$ = faktor koreksi untuk *cross-flow* dekat seabed

$\Psi_{trench,onset}$ = *Reduction factor* untuk *cross-flow* karena *trench*

2.2.15 Tegangan Ekvivalen (*Von Mises Stress*)

Untuk mengetahui kondisi batas kelayakan operasi pada suatu sistem pipa bawah laut diperlukan analisis tegangan pipa. Pada perhitungan ini menggunakan ketentuan yang divalidasi terhadap aturan yang ada dalam *code* desain pipa yang digunakan.

Beban yang bekerja pada pipa bawah laut (*offshore pipeline*) akan menyebabkan timbulnya tegangan di dinding pipa. Kombinasi tegangan – tegangan yang bekerja pada dinding pipa menyebabkan regangan atau defleksi.

Berdasarkan ASME B31.8: (*Gas Transmission and Distributing Piping System*) memberikan batasan-batasan pada tegangan yang terjadi pada pipa penyalur gas dengan menggunakan konsep *allowable stress design*. Berdasarkan kode ini, tegangan yang diizinkan terjadi pada pipa penyalur gas ditampilkan pada Tabel 2.9 berikut:

Tabel 2.9 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8

<i>Design Calculation</i>	<i>Allowable Stress</i>		
	<i>Hoop Stress</i>	<i>Longitudinal Stress</i>	<i>Combined Stress</i>
<i>Operation</i>	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS
<i>Hydrotest</i>	90% SMYS	-	96% SMYS
<i>Installation</i>	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS

(ASME B31.8, 2012)

2.2.14.1 Tegangan *Hoop*

Tegangan *hoop* merupakan tegangan yang bekerja pada dinding pipa akibat adanya pengaruh tekanan dari sisi luar dan dalam pipa. Tegangan ini bekerja pada arah *tangensial* atau *circumferential* (Guo dkk., 2014). ASME B31.8 merumuskan Persamaan tegangan pada Persamaan 2.65 dan 2.66 berikut:

$$\sigma_h = \begin{cases} (p_i - p_e) \frac{D_0}{2t} & \text{untuk } \frac{D}{t} \geq 30 \\ (p_i - p_e) \frac{D_0 - t}{2t} & \text{untuk } \frac{D}{t} < 30 \end{cases} \dots\dots\dots(2.65)$$

Dimana,

σ_h = tegangan *hoop* (MPa)

p_i = tekanan desain internal pipa (MPa)

p_e = tekanan eksternal (MPa)

D_0 = Diameter luar pipa (tanpa coating) (m)

t = ketebalan pipa (m)

2.2.14.2 Tegangan *Longitudinal*

Menurut Bai dan Bai, 2014, tegangan longitudinal merupakan tegangan aksial yang berkerja pada dinding pipa. Menurut ASME B31.8 Komponen utama tegangan longitudinal adalah tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Persamaan tegangan longitudinal adalah sebagai berikut :

$$\sigma_L = \sigma_a + \sigma_b \text{ atau } \sigma_a - \sigma_b \dots\dots\dots(2.67)$$

Dimana,

$$\sigma_L = \text{tegangan longitudinal} \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_a = \text{tekanan aksial kombinasi} \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_b = \text{tekanan bending} \quad (\text{MPa})$$

Untuk pipa yang mengalami bentangan bebas, pipa dapat dianggap dalam kondisi *restrained* karena terdapat asumsi tumpuan pada bentangan bebas. Tumpuan pipa dapat menahan gerakan aksial, gerakan lateral maupun rotasi pipa yang dapat mempengaruhi tegangan pipa akibat tekanan dan temperatur pipa. Menurut ASME B31.8, tegangan aksial kombinasi dijelaskan di dalam Persamaan 2.68 dan 2.69 berikut:

$$\sigma_a = \sigma_{a0} + v_{st}\sigma_h + \sigma_t \dots\dots\dots(2.68)$$

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} + v_{st}\sigma_h + E_{st}\alpha_e(T_1 - T_2) \dots\dots\dots(2.69)$$

Dimana,

$$\sigma_{a0} = \text{tegangan aksial} \quad (\text{MPa})$$

$$F_a = \text{gaya aksial} \quad (\text{N})$$

$$\sigma_t = \text{tegangan thermal} \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_1 = \text{temperatur pipa saat instalasi} \quad (^\circ\text{C})$$

$$T_2 = \text{temperatur pipa saat operasi} \quad (^\circ\text{C})$$

$$v_{st} = \text{poisson ratio pipa baja}$$

Tegangan *bending* diakibatkan oleh momen yang terjadi pada bentangan bebas karena beban struktur pipa dan beban hidrodinamis. Persamaan tegangan *bending* dijelaskan pada Persamaan 2.70 berikut:

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{z_a} \dots \dots \dots (2.70)$$

Dimana,

M_i = *in-plane bending moment* (N.m)

M_o = *out-plane bending moment* (N.m)

i_i = *in-plane stress intensification factor*

i_o = *out-plane stress intensification factor*

z_a = modulus penampang pipa (cm³)

2.2.14.3 Tegangan Ekuivalen (*Von Mises*)

Tegangan ekuivalen atau *von mises* merupakan resultan dari seluruh tegangan yang terjadi pada pipa. Persamaan tegangan ekuivalen (*von mises*) ditampilkan pada Persamaan 2.71 berikut:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2} \dots \dots \dots (2.71)$$

Dimana,

τ = tegangan torsional (MPa)

Tegangan torsional biasanya relative kecil dibandingkan dengan tegangan – tegangan lain yang bekerja sehingga dapat diabaikan dalam analisis. Untuk kasus bentangan bebas pipa bawah laut dapat diabaikan sehingga nilainya adalah 0 (Bai dan Bai, 2014).

2.2.16 Umur Kelelahan Pipa

Fatigue life atau sisa waktu operasi merupakan jumlah siklus kelelahan yang terjadi pada suatu struktur hingga menyebabkan terjadinya kegagalan pada suatu struktur tersebut. Seperti yang telah dijelaskan pada DNV-RP- C 203 yaitu dimana dalam melakukan perhitungan *fatigue life*, menggunakan pendekatan kurva S-N dengan dengan metode *Palmgreen-Miner Rule*. Berikut ini ada beberapa faktor yang mempengaruhi sisa umur operasi (*fatigue life*) yaitu diantara: mikrosuktur dari material (bentuk dan ukuran kepadatan material), proses yang terjadi pada struktur pipa tersebut (riwayat deformasi, produk pabrik), beban spectrum, kondisi lingkungan (suhu, tingkat

korosifitas) serta geometri dari komponen (bentuk las-lasan, besarnya sudut dan ketebalan).

Komponen-komponen dasar dari analisa umur kelelahan (*fatigue life*) sebagai berikut:

1. Karakteristik siklus beban yang terjadi baik untuk kurun waktu pendek maupun kurun waktu panjang.
2. Perhitungan beban-beban siklis yang mengenai struktur.
3. Evaluasi siklus rentang tegangan pada suatu elemen yang ditinjau.
4. Perhitungan kerusakan pada elemen yang ditinjau akibat siklus rentang tegangan yang terjadi.
5. Evaluasi kekuatan elemen yan ditinjau.

Dalam desain suatu struktur pada kasus pipa bawah laut, salah satu kriteria persyaratan desainnya adalah memiliki waktu operasi yang tak terhingga waktunya untuk dapat bertahan karena adanya kegagalan akibat kelelahan pada pipa. Hal ini disebabkan karena dengan adanya persyaratan tersebut diharapkan struktur dari suatu pipa dapat memiliki tingkat maksimal *stress* yang melebihi ketahanan material dari pipa tersebut. Sehingga jika pipa mendapatkan tekanan baik itu dari dalam dan dari luar yang pada akhirnya menyebabkan pipa mengalami kelelahan, struktur material dari pipa tersebut masih mampu dalam menahan tingkat kelelahan yang terjadi atau dengan kata lain tidak terjadi kegagalan pada pipa tersebut.

2.2.16.1 *Fatigue Damage*

Berdasarkan DNV RP C203 untuk menentukan sisa waktu operasi harus mencari terlebih dahulu tingkat kelelahan dengan Persamaan 2.72:

$$D_{fat} = \sum \frac{n}{N} \dots \dots \dots (2.72)$$

Dimana,

D_{fat} = Akumulasi *fatigue damage*

n = Total number of stress cycles corresponding to Stress Range

N = Number cycles to failure at stress range

Untuk mendapatkan besarnya nilai n dan N maka diperlukan kurva S-N. Perhitungan umur kelelahan ini mengacu pada DNV GL RP F 105 dan DNV RP C203. Melalui proses pemilihan jenis kurvanya dan kategori kurva S-N, maka nilai N dapat diperoleh melalui persamaan 2.73 berikut ini (DNV RP-C 203):

$$\log N = \log a - m \log S_i \dots \dots \dots (2.73)$$

Dimana,

S_i = Stress Range

a = intercept of the design S-N Curve with the log N axis

m = negative inverse slope oh the S-N Curve

Pada kasus Tugas Akhir ini, *stress range* menggunakan metode perhitungan *response model* yang mengacu pada Code DNV RP F-105. Dalam acuan tersebut terdapat *stress range* yang berasal dari getaran arah *in-line* dan *cross-flow*. Berikut ini Persamaan 2.74 dan 2.75 yang digunakan dalam menghitung *stress range* pipa bawah laut:

$$S_{iL} = 2 \cdot A_{iL} \cdot \left(\frac{A_y}{D_{tot}} \right) \Psi_{\alpha, iL} \cdot \gamma_{iL} \dots \dots \dots (2.74)$$

Dimana,

S_{iL} = stress range pada arah *in-line* VIV (N/m²)

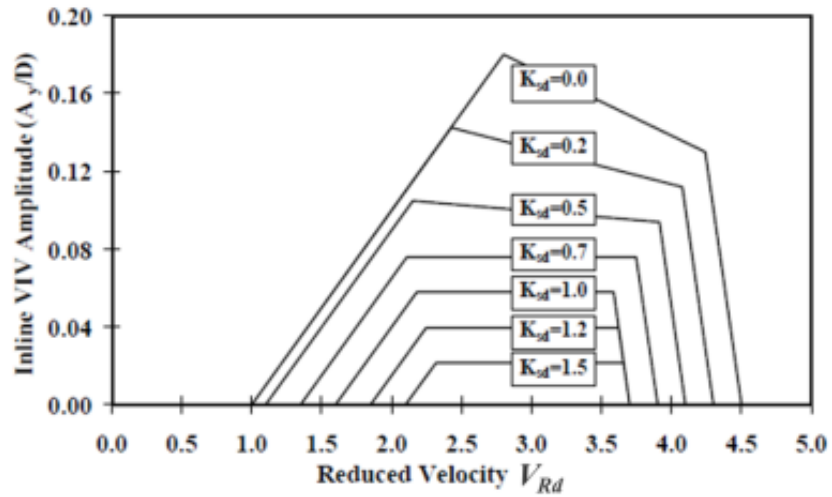
A_{iL} = unit stress amplitude, tegangann yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *in-line* (N/m²)

$\frac{A_y}{D_{tot}}$ = Amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah *in-line* VIV.

Dapat diperoleh dari Gambar 2.12

$\Psi_{\alpha, iL}$ = Faktor koreksi rasio kecepatan aliran arus.

γ_{iL} = Faktor keamanan untuk *in-line* VIV.



Gambar 2.12 Ilustrasi Respon Amplitudo pada *In-Line* VIV
versus V_{Rd} and K_{sd}

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot \left(\frac{A_z}{D_{tot}} \right) R_k \cdot \gamma_s \dots \dots \dots (2.74)$$

Dimana,

S_{CF} = stress range pada arah *cross-flow* VIV (N/m²)

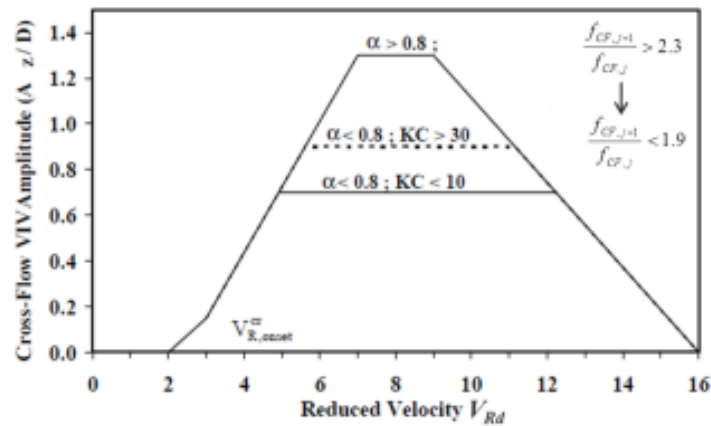
A_{CF} = unit stress amplitude, tegangann yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *cross-flow* (N/m²)

$\frac{A_z}{D_{tot}}$ = Amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah *cross-flow*

VIV. Dapat diperoleh dari Gambar 2.13

R_k = Faktor reduksi amplitude akibat adanya redaman.

γ_s = Faktor keamanan untuk *range* tengangan.



Gambar 2.13 Ilustrasi Respon Amplitudo pada *Cross-Flow* VIV versus V_{Rd} ,

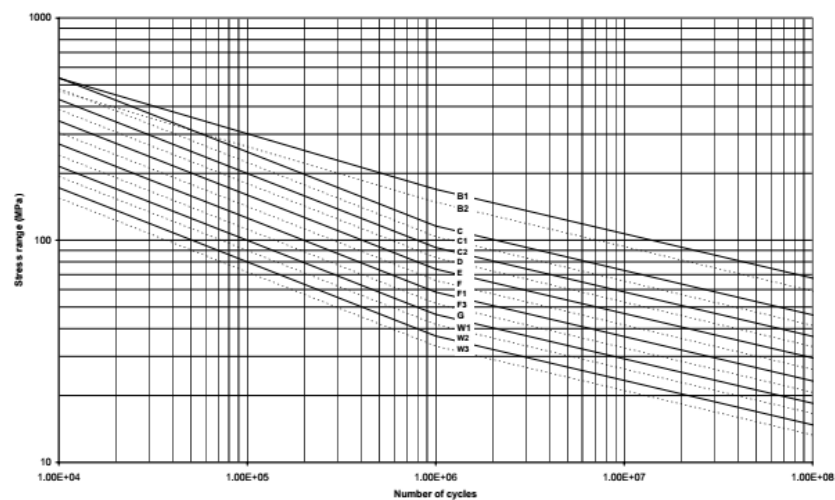
K_{sd}

Nilai n dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.14 sesuai nilai *stress range*. Probabilitas kejadian siklus tegangan pada nilai n berkisar 2 % -10%. Kurva S-N yang digunakan seperti pada Gambar 2.14, mengacu pada *Figure 2-5 DNV RP C203 Fatigue Strength of Offshore Steel Structure* yaitu kategori D. Pemilihan kurva harus didasarkan ciri-ciri struktur yang dianalisa. Berikut pemilihan jenis kurva S-N dan *plotting* tegangan dalam grafik kurva S-N dalam menentukan jumlah tegangan lelah yang terjadi di struktur tersebut dijelaskan oleh Tabel 2.10 dan Gambar 2.14

Tabel 2.10 Tabel *S-N Curve* di *Seawater* dengan *Cathodic Protection*
(DNV RP C203, 2005)

S-N curve	$N \leq 10^6$ cycles		$N > 10^6$ cycles	Fatigue limit at 10^7 cycles*)	Thickness exponent k	Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method
	m_1	$\log \bar{a}_1$	$\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	11.764	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

*) see also 2.10



Gambar 2.14 *Plotting Stress S-N Curve* di *Seawater* (DNV RP C203, 2005)

Pada perhitungan estimasi sisa waktu operasi harus di cari terlebih dahulu nilai rasio kelelahan kerusakan. Oleh sebab itu, dalam penentuan rasio *fatigue damage* atau rasio kelelahan kerusakan, semua komponen yang berasal dari sumber lainnya perlu dihitung lebih lanjut. Komponen tersebut meliputi adanya penambahan *safety factor* dan rasio *damage*. Penentuan jenis kurva S-N seperti pada Gambar 2.14 berdasarkan pada struktur yang digunakan. Maka dari itu, perlunya penyesuaian kurva-SN untuk mendapatkan grafik yang benar agar mendapatkan nilai jumlah siklus menuju gagal pada saat *stress range*.

2.2.16.2 Perkiraan Sisa Waktu Operasi *Pipeline*

Dalam melakukan perhitungan perkiraan sisa waktu operasi, dapat menggunakan perhitungan dengan berdasarkan persamaan yang telah ditentukan pada kode standar DNV GL RP F-105 sebagai berikut:

$$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{D_{fat,f105}} \times \eta \dots \dots \dots (2.76)$$

Dimana,

T_{life} = Sisa waktu operasi pipa

$T_{exposure}$ = Waktu pipa yang sudah beroperasi

$D_{fat,f105}$ = Total akumulasi *fatigue damage*

η = *safety factor*

Perhitungan akumulasi *fatigue damage* dari *code standard* DNV RP C203 berbeda parameter dengan perhitungan yang terdapat pada DNV GL RP F105. Maka dari itu perlu konversi akumulasi *fatigue damage*. Berikut persamaan yang digunakan dalam mengkonversi hubungan akumulasi dalam *fatigue damage*.

$$D_{fat,f105} = \frac{D_{fat}}{\alpha_{fat}} \times \eta \dots \dots \dots (2.77)$$

Dimana,

$D_{fat,f105}$ = *fatigue damage* DNV GL RP F105

D_{fat} = *fatigue damage* DNV RP C203

α_{fat} = *allowable damage ratio for fatigue*

Penentuan parameter *allowable damage ratio for fatigue* dapat menggunakan Tabel 2.11.

Tabel 2.11 *Allowable Damage Ratio for Fatigue*

Safety class	Low	Medium	High
α_{fat}	1/3	1/5	1/10

2.2.17 Aturan *Trenching* Pipa Bawah Laut

Berdasarkan peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia yang tertuang pada PM/68 Tahun 2011 mengenai alur-pelayaran di laut pasal 45 menyebutkan bahwa pembangunan pipa dan kabel laut dilakukan dengan cara pemendaman. Pemendaman sebagaimana dimaksud dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut:

- a. Penempatannya di sisi terluar alur-pelayaran;
- b. Alur-pelayaran dengan kedalaman laut kurang dari 20 (dua puluh) meter kabel laut dan pipa bawah laut harus dipendam 4 (empat) meter di bawah permukaan dasar laut (*natural seabed*);
- c. Alur-pelayaran dengan kedalaman 20 (dua puluh) meter sampai 40 (empat puluh) meter kabel laut dan pipa bawah laut harus dipendam 2 (dua) meter di bawah permukaan dasar laut (*natural seabed*); atau
- d. Alur-pelayaran dengan kedalaman lebih dari 40 (empat puluh) meter, kabel laut, dan pipa bawah laut harus dipendam 1 (satu) meter di bawah permukaan dasar laut (*natural seabed*);
- e. Pada lokasi tertentu untuk mengantisipasi pengembangan pelabuhan dan kepadatan lalu lintas pelayaran perlu dilakukan

- penilaian resiko (*risk assesment*) antara lain melalui kegiatan penjatuhan jangkar kapal terbesar (*anchor drop test*); dan
- f. Pemendaman harus duduk stabil pada posisinya.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB III

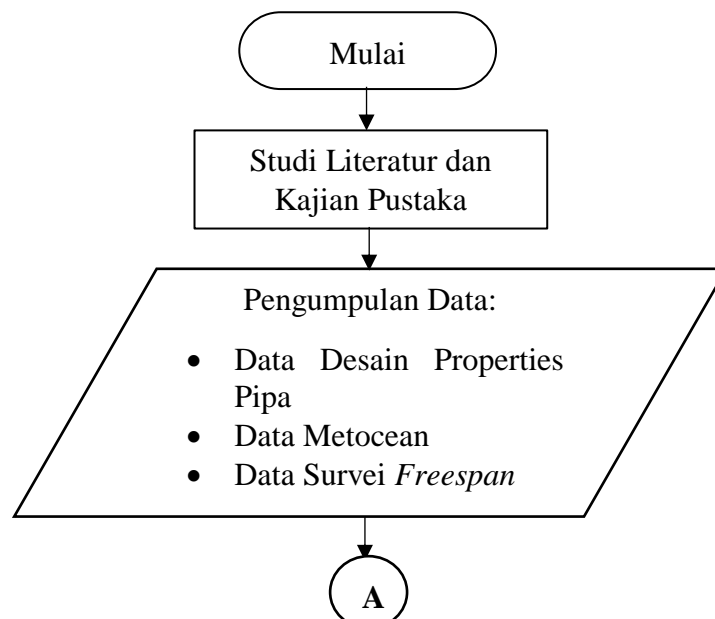
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

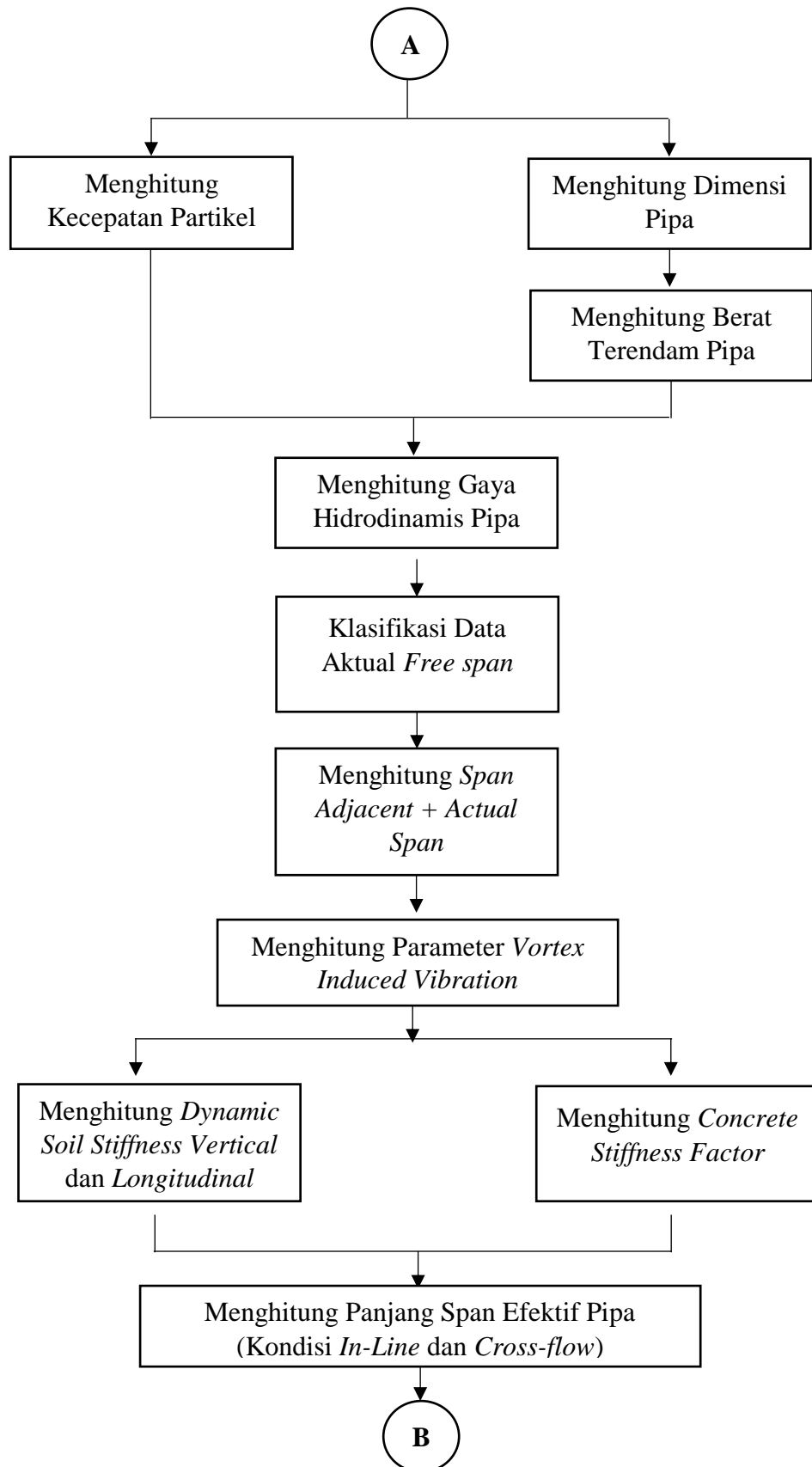
Metodologi penelitian merupakan suatu proses penentuan tahap – tahap dalam menentukan kegiatan yang dikerjakan, perhitungan dari awal hingga analisis yang dikerjakan untuk mencapai tujuan dari penelitian Tugas Akhir ini. Pengerjaan tugas akhir ini dijelaskan secara bertahap di dalam diagram alir dan prosedur penelitian. Pada subbab ini menguraikan langkah-langkah sistematis yang dilakukan dalam melakukan analisis statis dan dinamis yang terjadi pada *pipeline* yang mengalami *free span*. Kemudian melakukan analisis *fatigue* pada *pipeline* untuk mengetahui umur kelelahan pada pipa yang disebabkan oleh VIV. Prosedur dalam Tugas Akhir ini mencakup semua kegiatan yang dilaksanakan untuk memecahkan permasalahan yang terjadi. Pada dasarnya prosedur yang digunakan mengacu pada DNV GL RP F105 “Free Spanning Pipelines” 2017 dan DNV-RP-C203 “Fatigue Design Of Offshore Steel Structures” 2005.

3.1.1 Diagram Alir (*Flow Chart*)

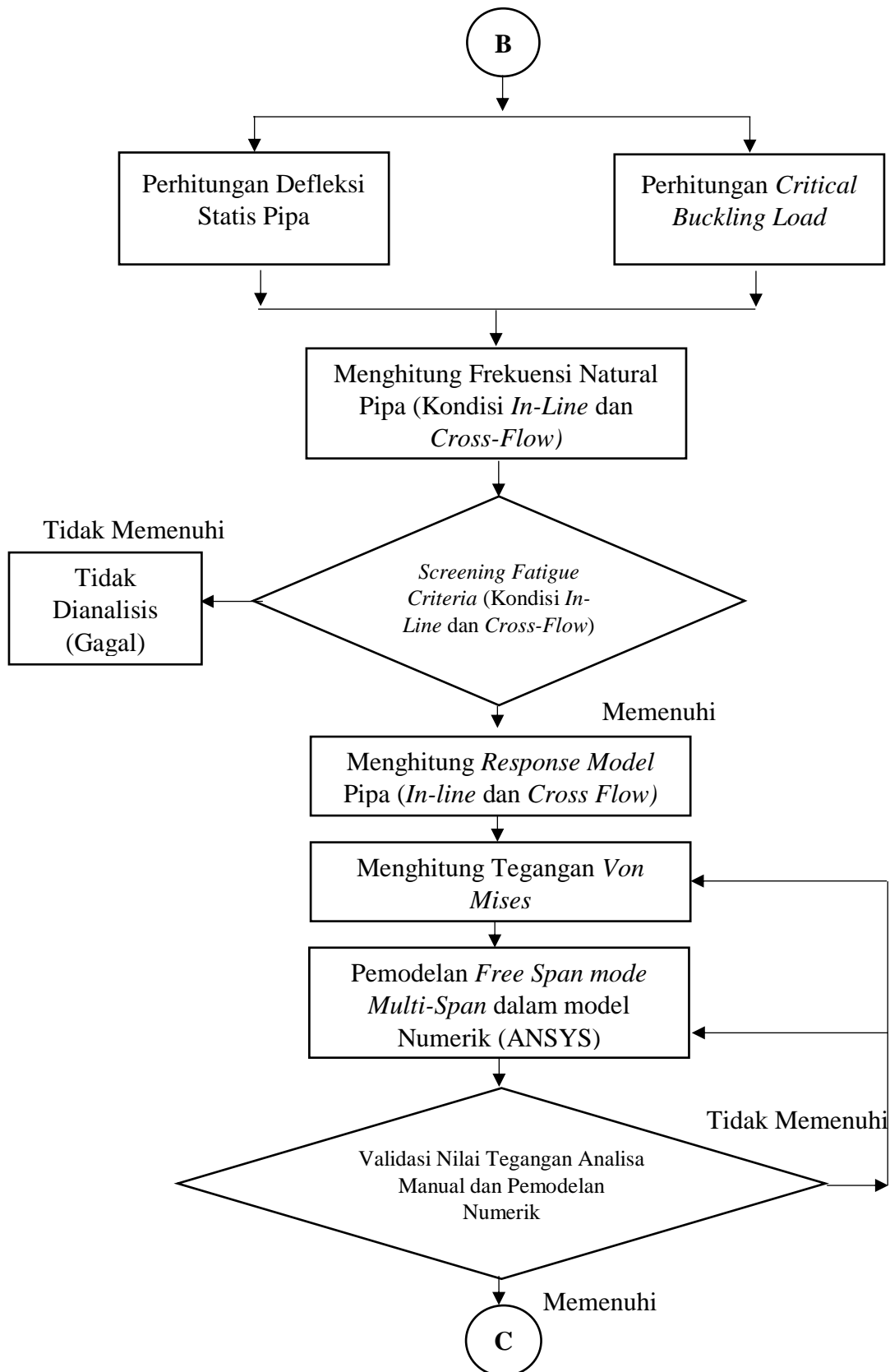
Metodologi penelitian tugas akhir dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 3.1:



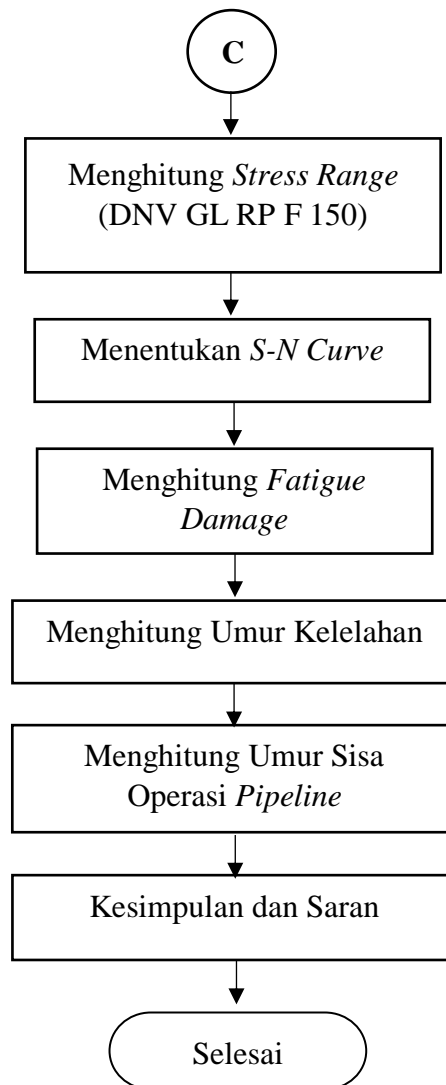
Gambar 3.1 Diagram Alir (*Flow Chart*) Tugas Akhir



Gambar 3.1 Diagram Alir (*Flow Chart*) Tugas Akhir



Gambar 3.1 Diagram Alir (Flow Chart) Tugas Akhir



Gambar 3.1 Diagram Alir (*Flow Chart*) Tugas Akhir

3.2 Prosedur Penelitian

Rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya diselesaikan dengan mengacu pada diagram alir. Diagram alir yang telah dibuat sebelumnya merupakan alur dari prosedur tugas akhir ini. Berikut penjelasan prosedur tugas akhir pada diagram alir:

1. Studi Literatur

Hal pertama yang dilakukan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini adalah mengumpulkan literatur yang berasal dari buku, jurnal penelitian, laporan tugas akhir dan *codes*. Literatur yang digunakan sebagai referensi mempunyai keterkaitan dengan teori pipa bawah

laut, analisis bentangan bebas dan analisis kelelahan pada pipa. *Codes* yang digunakan adalah DNV GL RP F 105 & DNV RP C203 yang berhubungan dengan *freespan* dan analisis *fatigue*. Dan ASME B31.8 untuk analisis tegangan pada pipa gas.

2. Pengumpulan Data

Tahap berikutnya adalah proses pengumpulan data *pipeline* berupa data *freespan* hasil survei ROV sepanjang jalur pipa bawah laut yang ditinjau, data *properties design* pipa, data lingkungan (*metocean*) di lokasi pipa beroperasi. Data yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan data 14" *Export Pipeline* jalur *Central Processing Platform* (CPP) – *Onshore Receiving Facility* (ORF) Pertamina Hulu Energi – *West Madura Offshore* (PHE WMO) sepanjang 65km dengan. Pipa menyalurkan gas dari *Central Processing Platform* menuju *Onshore Receiving Facility* (ORF) Gresik.

3. Perhitungan Dimensi dan Berat Terendam Pipa

Tahap perhitungan pertama kali adalah dilakukan perhitungan dimensi pipa. Dimensi pipa yang dihitung meliputi tebal dinding pipa, diameter total pipa, diameter dalam pipa, diameter *concrete*, diameter *corrosion coating*, momen inersia pipa, momen inersia *concrete*, dan luas penampang pipa. Kemudian dilakukan perhitungan massa efektif pipa yang merupakan total dari komponen massa seperti massa struktur pipa, massa konten pipa dan massa tambah pipa.

Berat terendam pipa dapat diperoleh dengan menjumlahkan berat seluruh struktur pipa dengan gaya apung pipa di dalam air. Berat seluruh struktur pipa dapat diperoleh dari massa seluruh struktur pipa (termasuk konten dan *coating*) dikalikan dengan gaya gravitasi. Sedangkan gaya apung dapat diperoleh dari massa air yang dipindahkan akibat pencelupan pipa di dalam air dikalikan dengan gaya gravitasi.

4. Perhitungan Kecepatan Partikel Air

Selanjutnya, mengolah data lingkungan (*metocean*) dalam hal ini adalah perhitungan arus dan gelombang untuk mendapatkan kecepatan partikel air di lokasi pipa. Kecepatan partikel air muncul akibat efek arus, gelombang, maupun kombinasi arus dan gelombang. Untuk gelombang, perlu dilakukan analisis spectra untuk gelombang acak. Untuk efek arus, kecepatan partikel air yang diukur pada elevasi tertentu harus ditransformasi terlebih dahulu menjadi kecepatan arus dasar laut di lokasi peletakan pipa.

5. Perhitungan Gaya Hidrodinamis pada Pipa

Gaya hidrodinamis yang terjadi pada pipa muncul akibat interaksi antara pipa dengan aliran air laut di sekitar pipa. Gaya hidrodinamis yang terjadi pada bentangan bebas pipa adalah gaya *drag* dan gaya inersia. Gaya-gaya ini dapat mempengaruhi kestabilan pipa terutama defleksi yang terjadi pada pipa.

6. Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness* dan *Concrete Stiffness Factor*

Dynamic soil stiffness merupakan kekakuan dinamis yang muncul akibat interaksi pipa dengan tanah. Sedangkan *concrete stiffness factor* merupakan faktor yang menambahkan kekakuan pipa akibat penambahan selimut beton. Keduanya dapat mempengaruhi dalam menentukan nilai β (*relative soil stiffness parameter*) yang merupakan parameter panjang efektif *freespan*.

7. Klasifikasi Data *Free Span*

Data *freespan* yang diperoleh dari survey dan inspeksi bawah laut yang dilakukan oleh ROV tidak selalu bisa digunakan langsung, akan tetapi harus dilakukan pengecekan dan perhitungan kembali panjang aktual *span* yang ditinjau dengan memvalidasi titik koordinat

freecspan pada setiap *Kilometre Point* (KP). Hasil data aktual *span* yang sudah divalidasi dapat diolah ke tahap selanjutnya.

8. Menghitung *Span Adjacent* dan *Actual Span*

Setelah didapatkan data aktual *span*, beberapa komponen dari data tersebut kemudian diolah dalam sebuah *spreadsheet* untuk mengetahui dimana *span* tersebut dimulai dan berakhir. Sehingga jejak *span* diketahui panjang tumpuan pipa dari *span* selanjutnya.

9. Klasifikasi *Single Span* dan *Multi-Span*.

Tahap berikutnya adalah menentukan *span* yang diolah pada tahap selanjutnya mengalami interkoneksi dengan *span* selanjutnya. Apabila parameter yang telah ditentukan menyatakan *span* mengalami interkoneksi dengan *span* selanjutnya maka jenis *span* tersebut adalah *Multi-span* dan sebaliknya bila tidak mengalami interkoneksi dengan *span* selanjutnya maka jenis *span* tersebut adalah jenis *Single-span*.

10. Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Panjang bentangan bebas efektif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV RP F105. Panjang bentangan bebas efektif dapat mempengaruhi defleksi statis, *critical buckling load* dan frekuensi natural pipa. Panjang bentangan bebas efektif ini akan dihitung untuk arah *in-line* dan *cross-flow* pipa.

11. Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Perhitungan frekuensi natural pipa memerlukan beberapa parameter yang terlebih dahulu dihitung besarannya. Beberapa diantaranya adalah *effective axial load*, defleksi statis dan *critical buckling load*. Ketiga parameter ini mempengaruhi besar frekuensi natural yang dimiliki oleh pipa. Persamaan untuk menghitung ketiga parameter ini terdapat di DNV RP F105. Selain ketiga parameter yang disebutkan di atas, perhitungan frekuensi natural pipa juga

memerlukan parameter CSF dari panjang bentangan bebas efektif yang telah dihitung sebelumnya.

12. *Screening Fatigue Criteria*

Frekuensi natural yang telah didapat kemudian di *screening* menggunakan kriteria yang ditentukan di dalam DNV RP F-105. *Screening* dilakukan untuk memeriksa panjang bentangan bebas pipa mana saja yang perlu dilakukan perhitungan umur kelelahan akibat *Vortex Induced Vibration*. Pada *Screening Fatigue Criteria*, Frekuensi natural pipa dibandingkan dengan frekuensi *fortex shedding*. Selain membutuhkan frekuensi natural, parameter lain yang dibutuhkan untuk proses *screening* adalah *reduced velocity* dan *current flow ratio*. *Span* yang memenuhi kriteria *screening* akan dilakukan perhitungan *fatigue life* nya, sedangkan yang tidak memenuhi tidak dianalisis

13. Perhitungan Tegangan (*Von-Mises Stress*) pada *Free Span* yang Ditinjau

Setelah *screening* panjang bentangan yang memenuhi kriteria dihitung tegangan yang terjadi di bentangan tersebut. Tegangan – tegangan ini kemudian di validasi dengan kriteria *allowable stress design* ASME B31.8

14. Pemodelan dan Validasi Tegangan pada Pipa Menggunakan ANSYS

Nilai validasi tegangan diperlukan sebagai pembanding dari perhitungan numerik yang dihasilkan dari *pipeline free span*. Nilai ini akan dibandingkan dengan tegangan *von-mises* pada perhitungan manual sehingga menjadi dapat menjadi Batasan untuk toleransi kesalahan suatu kriteria yang terlalu besar.

15. Perhitungan *Stress Range* (S)

Stress range dapat dihitung menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV RP F-105. Penggolongan *stress range* pada *codes* dibagi menjadi 2. *Stress range* untuk arah *in-line* dan *stress range* untuk arah *cross-flow*.

16. Penentuan Kurva S – N

Selanjutnya penentuan kurva S-N diperlukan untuk mengetahui berapa siklus yang dibutuhkan pipa tersebut untuk terjadi kegagalan pada rentang tegangan yang ditentukan (N). Untuk melengkapi penjelasan mengenai kurva S-N dalam DNV RP F105, direkomendasikan DNV RP C-203 mengenai “*Fatigue Design of Offshore Steel Structures*” sehingga pada tugas akhir ini Kurva S-N yang dipakai dalam perhitungan adalah kurva berdasarkan DNV RP C-203. Dari kurva diperoleh nilai konstanta kekuatan karakteristik *fatigue* dan nilai slope negative inverse (*m*).

17. Perhitungan *Fatigue Damage* dan Umur Kelelahan Pipa

Langkah selanjutnya adalah menghitung *fatigue damage* dari *stress range* & umur kelelahan pada pipa menggunakan teori *cumulative damage* / akumulasi kerusakan (Hukum Palmgren-Miner). Perhitungan dilakukan secara manual berdasarkan pada ketentuan yang ada pada DNV RP F-105.

18. Perhitungan Umur Sisa Operasi Pipa

Hasil akhir perhitungan umur sisa operasi pipa yang diakibatkan fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV) merupakan hasil akhir Tugas Akhir ini, sehingga diketahui sampai kapan pipa dapat beroperasi. Hasil tersebut nantinya digunakan sebagai acuan dalam analisis retifikasi dan mitigasi pipa bawah laut untuk mengurangi kemungkinan resiko kegagalan pipa.

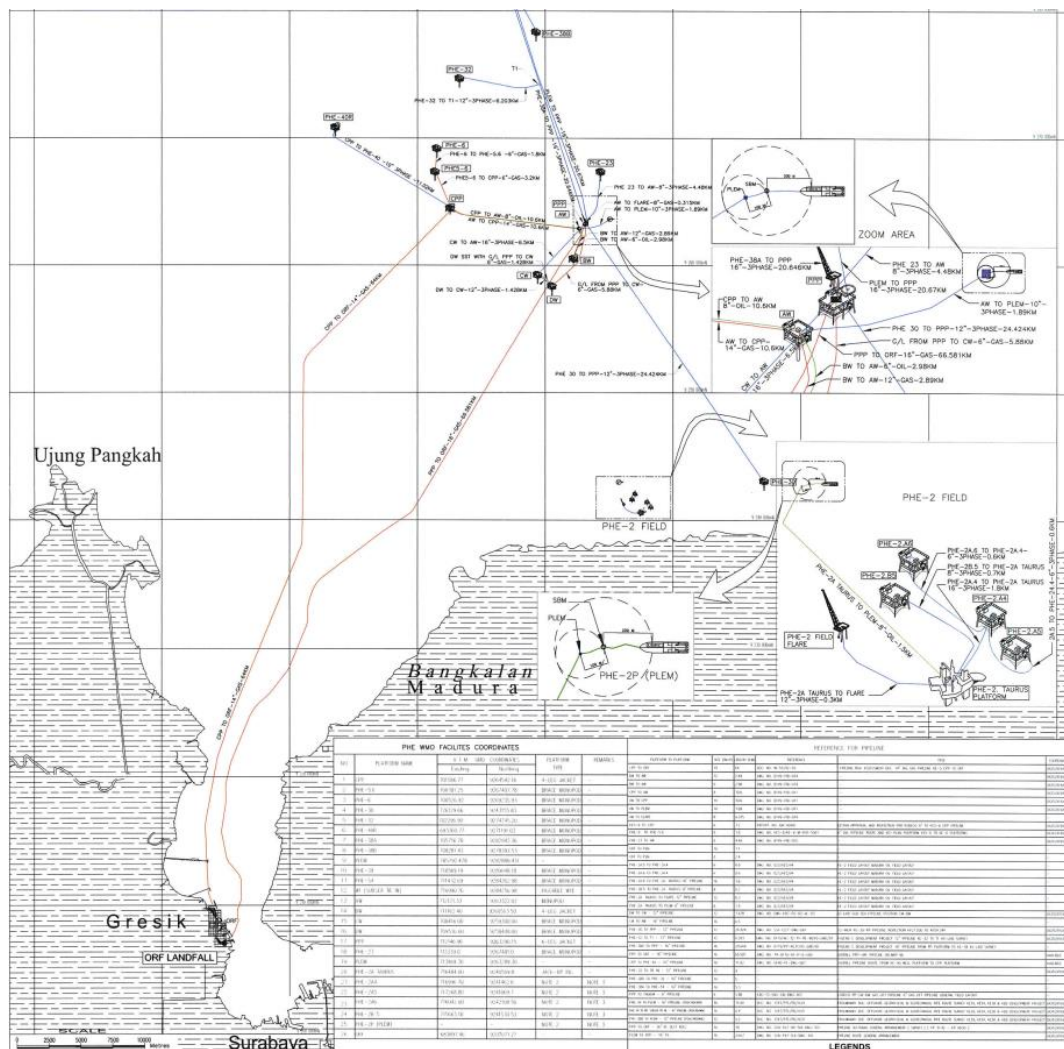
(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

Data – data yang dipakai dalam Tugas Akhir ini menggunakan studi kasus *Export Pipeline* milik Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore. Pipeline tersebut mendistribusikan gas dari *Central Processing Platform-2* menuju *Onshore Receiving Facility* (Gresik). Jalur Pipeline memiliki ukuran Panjang sekitar 65 km. Berikut gambar lokasi Pipeline yang ditinjau pada Gambar 4.1.



Studi kasus yang diangkat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yaitu terdapatnya beberapa segmen pipa yang mengalami bentangan bebas di jalur *pipeline* yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya. Inspeksi *span* ini dilakukan dengan survei jalur pipa pada tahun 2016. Dari hasil survei tersebut didapatkan informasi mengenai lokasi segmen pipa dengan data petunjuk panjang dan kedalaman *span*. Sehingga perlu dilakukan analisis bentangan bebas untuk mengetahui panjang bentangan bebas yang masih diizinkan terjadi pada pipa dan berapa umur sisa dari segmen pipa yang mengalami bentangan bebas. Studi kasus ini membutuhkan data – data di antaranya adalah data desain dan operasional pipa, data lingkungan, data karakteristik tanah di lokasi pipa dan data hasil survei bentangan bebas yang telah dilakukan.

4.1.1 Data Pipeline

a. Data Properti Pipa

Berikut data properti pipa PT. Pertamina Hulu Energi-West Madura Offshore (PHE WMO) yang ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Desain Pipa (PHE WMO, 2018)

Deskripsi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Steel Grade	API 5L-X65-W-PSL 2			
Process Manufacture	SEAMLESS			
Pipeline Route	Central Processing Platform - Onshore Receiving Facility			
Outside Diameter (D0)	355.6	mm	0.3556	m
Wall Thickness	14.3	mm	0.0143	m
Length	65	km	65000	m
Corrosion Allowance	3	mm	0.003	m
Steel Density	7850	kg/m ³	-	-
Young's Modulus Steel	207000	MPa	2.07E+11	Pa
Thermal Expansion Coeff.	1.17E-05	1/°C	-	-
SMYS	360	MPa	3.60E+08	Pa
SMTS	460	MPa	-	-

Tabel 4.1 Data Desain Pipa (PHE WMO, 2018)(Lanjutan)

Deskripsi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Poisson Ratio	0.3	-	-	-
Design Pressure	1440.2 5	psig	9930178. 1	Pa
Internal Pressure at Spanning Pipe	137.89	bar	13789000	Pa
Maximal Design Temperature	75	°C		
Minimal Design Temperature	-10	°C		
Maximum Operating temperature	65	°C		
Marine Growth	0	mm	0	m
Design Life	20	years	-	-
Service	GAS			
Content Density	29.3	kg/m ³	-	-
Gas Flowrate	70	MMSCF D	70.000	MMBtu

b. Data Coating Pipa

Pipa 18' *Export Pipeline* memiliki dua *coating* yang melapisinya. Berikut data *coating* pipa ditampilkan pada Tabel 4.2

Tabel 4.2. Data *Anti-Corrossion Coating* dan *Concrete Coating* (PHE WMO, 2018)

Deskripsi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Material Anti-Corrosion Coating	Asphalt Enamel			
Anti-Corrosion Coating Thickness	6	mm	0.006	m
Concrete Coating Thickness	50.8	mm	0.0508	m
Anti-Corrosion Coating Density	1280	kg/m ³	-	-
Concrete Coating Density	3043	kg/m ³	-	-

4.1.2 Data Lingkungan (*Metoccean Data*)

Data – data lingkungan yang digunakan antara lain adalah data arus serta gelombang dan data karakteristik tanah, data di sekitar perairan Madura, Poleng *Field* tersebut ditampilkan dalam Tabel 4.3

Tabel 4.3 Data Lingkungan (PHE WMO, 2013)

Deskripsi	Nilai			Satuan
	1 Tahun	10 tahun	100 tahun	
Significant Wave Height, Hs	1.08	2.9	4.17	m
Significant Wave Period, Ts	5.51	8.085	9.035	sec
Peak Period for Design Spectrum, Tp	5.8	8.51	9.51	sec
Current Velocity				
Surface	1.07	1.37	1.7	m/s
Bottom	0.24	0.5	0.9	m/s
Highest Astronomical Tide (HAT), Above MSL	1.1	1.39	1.54	m
Lowest Astronomical Tide (LAT), Below MSL	-0.67	-0.38	-0.17	m
Seawater Kinematics Viscosity	1.02E-06			m ² /s
Maximum Water Depth	56.77			m
Minimum Water Depth	51.1			m

c. **Data Karakteristik Tanah**

Tabel 4.4. Data Karakteristik Tanah

Deskripsi	Nilai	Satuan
Jenis Tanah	Fine to medium loose sands	-
Layer thickness	0.5 - 0.8	m
Unit Weight (undrained)	15.6	kN/m ³
Lateral Friction Factor	0.6	

4.1.3 Data Inspeksi *Free Span*

Data inspeksi yang dilakukan oleh PHE WMO adalah menggunakan ROV yang kemudian dicatat untuk mendapatkan data *free span* Aktual. Studi kasus di tugas akhir ini merupakan hasil inspeksi pada tahun 2016. Berikut data *span* actual beserta ketinggian jarak antara pipa dengan *seabed* yang mengalami penggerusan, yang ditampilkan pada Tabel 4.5

Tabel 4.5 Data *Free Span* Hasil Inspeksi Bawah Laut (PHE WMO, 2016)

No	KP Event (km)	KP Length (m)	Height (m)	Location
1	11.992 - 11.998	5.38	0.3	Under of Pipe
2	12.058 - 12.061	2.88	0.3	Under of Pipe
3	12.126 - 12.14	12.87	0.5	Under of Pipe
4	12.239 - 12.243	3.61	0.3	Under of Pipe
5	12.284 - 12.302	19.15	0.3	Under of Pipe
6	12.34 - 12.347	6.88	0.3	Under of Pipe
7	12.397 - 12.404	6.98	0.3	Under of Pipe
8	12.572 - 12.579	7.44	0.5	Under of Pipe
9	12.6 - 12.616	16.08	0.3	Under of Pipe
10	12.625 - 12.628	4.39	0.3	Under of Pipe
11	12.631 - 12.638	7.68	0.3	Under of Pipe
12	12.647 - 12.659	12.11	0.3	Under of Pipe
13	12.697 - 12.709	11.89	0.3	Under of Pipe
14	12.723 - 12.735	11.38	0.5	Under of Pipe
15	12.736 - 12.747	10.63	0.5	Under of Pipe
16	12.768 - 12.778	10.41	0.3	Under of Pipe
17	12.806 - 12.821	15.54	0.7	Under of Pipe

Tabel 4.5 Data *Free Span* Hasil Inspeksi Bawah Laut Lanjutan (PHE WMO, 2016)

No	KP Event (km)	KP Length (m)	Height (m)	Location
18	12.828 - 12.836	6.73	0.3	Under of Pipe
19	12.857 - 12.869	12.65	0.2	Under of Pipe
20	12.993 - 13.002	8.63	0.1	Under of Pipe

4.2 Analisis Dimensi Pipa

4.2.1 Perhitungan Dimensi Pipa

Perhitungan dimensi pipa di sini, dilakukan untuk menghitung diameter pipa ataupun massa total dari pipa itu sendiri. Perhitungan dimensi pipa ini digunakan sebagai dasar untuk melakukan perhitungan analisis *freespan* selanjutnya, seperti perhitungan panjang efektif *span*, frekuensi natural, dan *screening*. Berikut Tabel 4.6 menampilkan hasil perhitungan dimensi pipa.

Tabel 4.6 Perhitungan Dimensi Pipa

Perhitungan Dimensi Pipa Baja			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal Dinding Pipa	t_2	0.0113	M
Diameter Total Pipa	D_t	0.469	M
Diameter Dalam Pipa	D_i	0.327	M
Diameter Lapisan Anti Korosi	D_{cc}	0.368	M
Diameter Lapisan <i>Concrete</i>	D_{conc}	0.469	M
Luas Penampang Internal Pipa Baja	A_i	0.084	m ²
Luas Penampang Pipa Baja	A_{st}	0.015	m ²
Luas Penampang Lapisan Anti Korosi	A_{cc}	0.007	m ²
Luas Penampang Lapisan <i>Concrete</i>	A_{conc}	0.067	m ²
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	2.24×10^{-4}	m ⁴
Momen Inersia Selimut Beton	I_{conc}	1.48×10^{-3}	m ⁴

Hasil perhitungan dimensi pipa akan digunakan dalam proses perhitungan massa efektif yang dijelaskan pada subbab selanjutnya.

4.2.2 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa adalah jumlah dari massa seluruh struktur pipa ditambah dengan massa fluida yang dialirkan dan massa tambah. Hasil penjumlahan massa struktur pipa dan massa konten pipa ditampilkan dalam Tabel 4.7

Tabel 4.7 Perhitungan Massa Pipa di Udara

Perhitungan Massa Pipa di Udara			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Massa Konten Pipa	M_{fluida}	2.46	Kg/m
Massa Pipa Baja	M_{st}	120.36	Kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	M_{cc}	8.72	Kg/m
Masa Lapisan <i>Concrete Coating</i>	M_{conc}	203.19	Kg/m
Total		337.74	Kg/m

Untuk massa tambah pipa diperlukan variabel koefisien massa tambah yang harus dicari terlebih dahulu. Koefisien massa tambah dapat ditentukan dengan ketentuan yang ada di dalam DNV.GL RP F-105 2017. Nilai koefisien massa tambah, massa tambah dan massa efektif keseluruhannya ditampilkan dalam Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Perhitungan Massa Efektif						
Panjang Span Aktual	Gap (e)	Rasio e/Dt	Ca	Massa Bouyancy	Massa Tambah	Massa Efektif
m	M	-	-	Kg/m	Kg/m	Kg.m
5.38	0.30	0.639	1.061	177.227	188.079	522.819
2.88	0.30	0.639	1.061	177.227	188.079	522.819
12.87	0.50	1.066	1.000	177.227	177.227	511.967
3.61	0.30	0.639	1.061	177.227	188.079	522.819

Tabel 4.8 Perhitungan Massa Efektif Pipa (Lanjutan)

Perhitungan Massa Efektif						
Panjang Span Aktual	Gap (e)	Rasio e/Dt	Ca	Massa Bouyancy	Massa Tambah	Massa Efektif
m	m	-	-	Kg/m	Kg/m	Kg.m
19.15	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
6.88	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
6.98	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
7.44	0.50	1.066	1.000	177.23	177.23	511.97
16.08	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
4.39	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
7.68	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
12.11	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
11.89	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
11.38	0.50	1.066	1.000	177.23	177.23	511.97
10.63	0.50	1.066	1.000	177.23	177.23	511.97
10.41	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
15.54	0.70	1.492	1.000	177.23	177.23	511.97
6.73	0.30	0.639	1.061	177.23	188.08	522.82
12.65	0.20	0.426	1.191	177.23	211.07	545.81
8.63	0.10	0.213	1.455	177.23	257.79	592.53

4.2.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Analisis berat terendam pipa diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Berat yang dihitung adalah berat material (baja), berat muatan pipa (dalam kondisi operasi), berat *coating*, berat *concrete*, berat akibat *buoyancy*. Hasil perhitungan berat terendam pipa disajikan dalam Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4.9 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Perhitungan Berat Terendam Pipa			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Massa Konten Pipa	M_{fluida}	2.46	Kg/m
Massa Pipa Baja	M_{st}	120.36	Kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	M_{cc}	8.72	Kg/m
Massa Lapisan <i>Concrete</i>	M_{conc}	203.19	Kg/m
Massa Struktur Pipa	M_{str}	332.28	Kg/m
Massa <i>Displacement</i>	M_{disp}	177.23	Kg/m
Gaya Apung	F_b	1738.6	N/m
Berat Terendam Pipa	W_{sub}	1545.2	N/m

4.3 Analisis Kecepatan Partikel Air

4.3.1 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa

Arus yang dianalisis adalah arus yang arahnya tegak lurus dengan pipa (sudut 90°), karena arah tersebut memiliki pengaruh beban arus yang paling besar dibandingkan dengan arah yang lain. Aliran arus yang digunakan pada penelitian ini adalah *inner zone*. Zona ini memiliki nilai kelajuan arus rata – rata yang berbeda searah dengan arah horizontal dan kecepatan arus beserta arahnya merupakan fungsi dari geometri dasar laut.

Hal yang harus dipertimbangkan dalam menghitung kecepatan arus yang bekerja pada pipa adalah kekasaran dasar laut (z_o) karena letak pipa dekat dengan dasar laut dan gap (e) karena pipa meletak pada dasar laut dengan kondisi *freespan*. Nilai kekasaran dasar laut disesuaikan dengan jenis tanah pada posisi pipa meletak. Hasil perhitungan kecepatan arus yang bekerja pada pipa disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Perhitungan Kecepatan Arus pada Pipa

Perhitungan Kecepatan Arus Pada Elevasi Pipa					
Panjang Span Aktual	Gap	Kecepatan Arus Pada Ketinggian Refrensi, 1 Tahun $U(z_r)$	Elevasi Diatas Dasar Laut	Parameter Kekasaran Dasar Laut	Kecepatan Arus 10 tahun
m	m	m/s	m	m	m/s
5.38	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
2.88	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
12.87	0.5	0.5	0.735	1.0×10^{-5}	0.487
3.61	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
19.15	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
6.88	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
6.98	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
7.44	0.5	0.5	0.735	1.0×10^{-5}	0.487
16.08	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
4.39	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
7.68	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
12.11	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
11.89	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
11.38	0.5	0.5	0.735	1.0×10^{-5}	0.487
10.63	0.5	0.5	0.735	1.0×10^{-5}	0.487
10.41	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
15.54	0.7	0.5	0.935	1.0×10^{-5}	0.497
6.73	0.3	0.5	0.535	1.0×10^{-5}	0.473
12.65	0.2	0.5	0.435	1.0×10^{-5}	0.464
8.63	0.1	0.5	0.335	1.0×10^{-5}	0.452

4.3.2 Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang pada Pipa

Kecepatan arus akibat gelombang dapat dicari dengan mengolah data gelombang menggunakan spectrum gelombang. Spektrum gelombang yang digunakan adalah spektrum JONSWAP. Karena pipa yang di analisis di dalam tugas akhir ini terletak di perairan Indonesia yang merupakan perairan tertutup (kepulauan)

Data gelombang yang digunakan dalam perhitungan kecepatan arus akibat gelombang dijelaskan pada Tabel 4.11

Tabel 4.11 Data Gelombang Perairan Madura

Data Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Kedalaman	h	56.77		m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	1.08	4.17	s
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5.51	9.0345	s

Data di atas kemudian diolah untuk mencari parameter parameter spektrum JONSWAP yaitu periode puncak gelombang, frekuensi puncak gelombang, fungsi distribusi, *peakedness parameter* dan konstanta *generalized Philips* ditampilkan pada Tabel 4.12

Tabel 4.12 Parameter JONSWAP

Parameter JONSWAP				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	1.08	4.17	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5.51	9.0345	s
Periode Gelombang Signifikan	ω_s	1.14	0.70	rad/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	5.80	9.51	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	1.08	0.66	rad/s
Fungsi Distribusi	ϕ	5.581	4.657	
<i>Peakedness Parameter</i>	γ	1.00	1.00	
Konstanta <i>Generalised Philips</i>	α	0.00522	0.01076	

Langkah selanjutnya adalah menentukan angka gelombang, Angka gelombang merupakan salah satu variabel yang digunakan untuk mentransformasi gelombang permukaan ke gelombang di elevasi pipa. Angka gelombang diperoleh dengan iterasi.

Setelah angka gelombang diperoleh, selanjutnya adalah menghitung spektrum gelombang dan transformasi gelombang. Kemudian menentukan momen spektrum dengan metode *Simpson 1*. Setelah momen spektrum ditentukan, kecepatan arus signifikan normal pada elevasi pipa dapat ditentukan. Kemudian kecepatan arus signifikan normal pada elevasi pipa diolah menggunakan persamaan untuk mempertimbangkan efek arah datang arus dan sebaran gelombang,

Terdapat variable *reduction factor* pada persamaan yang dapat ditentukan menggunakan grafik. Untuk nilai kecepatan arus signifikan normal pada pipa untuk setiap gap dicantumkan dalam lampiran. Berikut hasil kecepatan arus signifikan normal pada pipa untuk gap 0,1 dijelaskan pada Tabel 4. 13 sebagai berikut:

Tabel 4.13 Perhitungan Hasil Kecepatan Arus Akibat Pengaruh Gelombang Signifikan pada Pipa

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Kecepatan Arus Signifikan Pada Elevasi Pipa	U_s	1.81×10^{-3}	1.24	m/s
<i>Mean Zero Up-Crossing Period</i>	T_u	3.08	3.11	s
<i>Reduction Factor</i>	R_D	0.95		-
Kecepatan Arus Signifikan Normal Pada Pipa	U_w	1.72×10^{-3}	0.12	m/s
Periode Natural Gelombang	T_n	5.78		s
Osilasi Gelombang	τ	3501.97	3474.23	

Tabel 4.14 Total Kecepatan Arus

Panjang Span (m)	Gap (e) m	Kecepatan Arus Murni (m/s)		Kecepatan arus disebabkan gelombang (m/s)		Kecepatan Arus Total (m/s)	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
5.38	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
2.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
12.87	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
3.61	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
19.15	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
6.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
6.98	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
7.44	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
16.08	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
4.39	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
7.68	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
12.11	0.3	0.473	0.851	0.005	0.118	0.478	0.969
11.89	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
11.38	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
10.63	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
10.41	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
15.54	0.7	0.497	0.895	0.002	0.118	0.499	1.013
6.73	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
12.65	0.2	0.464	0.835	0.002	0.118	0.466	0.953
8.63	0.1	0.452	0.814	0.002	0.118	0.454	0.933

4.4 Analisis *Vortex Induced Vibrations*

Parameter VIV yang digunakan dalam analisis terdiri dari *stability parameter*, *current flow ratio*, bilangan *keulegan carpenter* dan *reduced velocity*. Beberapa parameter awal yang digunakan dalam perhitungan parameter VIV disajikan pada Tabel 4.15 berikut:

Tabel 4.15 Parameter Awal Perhitungan Awal

PARAMETER AWAL				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
<i>Soil damping</i>	ζ_{soil}	0.01		-
<i>Hidrodynamic damping</i>	ζ_h	0.00		-
<i>Structural damping</i>	ζ_{str}	0.025		-
Kekasaran permukaan pipa	k	0.003		m
Diameter total pipa	D_t	0.469		m
Rasio k/ D_t	k/D_t	0.007		-
frekuensi gelombang signifikan	ω_s	5.51	9.03	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	ν_k	1.02E-06		m^2/s
Densitas Air Laut	ρ_w	1025		kg/m^3
<i>Stability parameter safety factor</i>	γ_k	1.15		-

a. *Stability Parameter*

Parameter stabilitas mempengaruhi *reduced velocity* terutama keadaan *in-line*. Parameter ini dipengaruhi oleh massa efektif pipa dan modal *damping*. Modal *damping ratio* terdiri dari *structural damping*, *hydrodynamic damping*, *soil damping* yang disajikan pada Tabel 4.16 Untuk menambah keamanan, parameter stabilitas yang dipeoleh kemudian dikalikan *safety factor* sebesar 1.3. Hasil *stability parameter* ditampilkan pada Tabel 4.16

Tabel 4.16 Perhitungan *stability Parameter*

Nilai <i>Stability Parameter</i>						
<i>span</i>	Kecepatan Arus Total (m/s)		Current Flow ratio (α)	Reynolds Number		Nilai Stabilitas (K_{sd})
	10 tahun	100 tahun		10 tahun	100 tahun	
5.38	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
2.88	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
12.87	0.488	0.994	0.998	2.25×10^5	4.57×10^5	0.713
3.61	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
19.15	0.475	0.969	0.998	2.25×10^5	4.57×10^5	0.728

Tabel 4.16 Perhitungan *stability Parameter* (Lanjutan)

Nilai <i>Stability Parameter</i>						
<i>Span</i> (<i>m</i>)	Kecepatan Arus Total (m/s)		Current Flow ratio (α)	Reynolds Number		Nilai Stabilitas (K_{sd})
	10 Tahun	100 tahun		10 Tahun	100 tahun	
6.88	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
6.98	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
7.44	0.488	0.994	0.998	2.25×10^5	4.57×10^5	0.713
16.08	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
4.39	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
7.68	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
12.11	0.478	0.969	0.994	2.20×10^5	4.46×10^5	0.728
11.89	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
11.38	0.488	0.994	0.998	2.25×10^5	4.57×10^5	0.713
10.63	0.488	0.994	0.998	2.25×10^5	4.57×10^5	0.713
10.41	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
15.54	0.499	1.013	0.998	2.29×10^5	4.66×10^5	0.713
6.73	0.475	0.969	0.998	2.18×10^5	4.46×10^5	0.728
12.65	0.466	0.953	0.998	2.14×10^5	4.46×10^5	0.760
8.63	0.454	0.933	0.998	2.18×10^5	4.38×10^5	0.825

b. *Current Flow Ratio*

Parameter *current flow ratio* dapat mempengaruhi bentuk aliran. Parameter ini dapat ditentukan menggunakan persamaan. *Current flow ratio*.

c. *Keulegan-Carpenter Number*

Bilangan *keulegan carpenter* merupakan parameter yang dapat menentukan perubahan jenis aliran partikel air (laminar/turbulen) pada silinder di bawah air, bersamaan dengan bilangan *Reynold* (Re). Parameter ini dapat ditentukan menggunakan persamaan. Bilangan ini dipengaruhi oleh kecepatan arus, frekuensi gelombang dari diameter silinder atau pipa. Hasil bilangan *keulegan carpenter* disajikan di dalam Tabel 4.17

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Nilai Keulegan-Carpenter dan *Reduced Velocity*

Nilai <i>KC</i> dan <i>Reduced Velocity</i>					
<i>Span</i> (m)	Kecepatan Arus akibat Gelombang (m/s)		Keulegan Carpenter Number		Reduced Velocity (<i>V_r</i>)
	10 Tahun	100 tahun	10 Tahun	100 tahun	
5.38	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
2.88	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
12.87	0.002	0.118	0.00321	0.36	5.097
3.61	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
19.15	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
6.88	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
6.98	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
7.44	0.002	0.118	0.00321	0.36	5.097
16.08	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
4.39	0.002	0.118	0.00321	0.36	4.970
7.68	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
12.11	0.005	0.118	0.00886	0.36	4.969
11.89	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
11.38	0.002	0.118	0.00321	0.36	5.097
10.63	0.002	0.118	0.00321	0.36	5.097
10.41	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
15.54	0.002	0.118	0.00321	0.36	5.193
6.73	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.969
12.65	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.886
8.63	0.002	0.118	0.0032	0.36	4.782

Dari perhitungan parameter VIV yang diperoleh komponen nilai *Reynolds number* memasuki angka $>10^5$ yang artinya aliran yang terjadi adalah jenis aliran laminar yang bertransisi menjadi aliran turbulen dengan nilai *reduced velocity* berada pada angka > 2.3 yang dikategorikan bisa menyebabkan pipa mengalami getaran dan terjadi VIV.

4.5 Analisis Gaya Hidrodinamis

Perhitungan gaya hidrodinamis ini dilakukan untuk mengetahui besar gaya yang diakibatkan oleh arus dan gelombang laut terhadap pipa. Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa adalah gaya *drag* dan gaya angkat (*lift*).

4.5.1 Perhitungan Gaya Drag

Gaya *drag* pada analisis bentangan bebas mempengaruhi besar defleksi yang terjadi pada pipa. Sebelum gaya *drag* dihitung, koefisien *drag* harus diperoleh terlebih dahulu. Dalam persamaan ada beberapa parameter yang mempengaruhi gaya drag yang dijelaskan pada persamaan. Beberapa parameter awal yang digunakan untuk perhitungan koefisien *drag* ditampilkan pada Tabel 4.18 berikut:

Tabel 4.18 Parameter Koefisien *Drag*

PARAMETER KOEFISIEN DRAG				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Kekasaran Permukaan Pipa	k	0.003		m
Diameter Total Pipa	D_t	0.469		m
Rasio k/D_t	k/D_t	0.007		-
Periode Gelombang Signifikan	ω_s	5.51	9.03	rad/s

Hasil parameter – parameter yang mempengaruhi koefisien *drag* dan besar koefisien *drag* ditampilkan pada Tabel 4.19 berikut:

Tabel 4.19 Hasil Koefisien *Drag*

Koefisien Drag							
Length (m)	Gap (m)	C_D^0	$\Psi^{CD}_{KC,\alpha}$	Ψ^{CD}_{proxi}	Ψ^{CD}_{trench}	Ψ^{CD}_{VIV}	C_D
5.38	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
2.88	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
12.87	0.5	1.02	1	1.000	1	1.015	1.036
3.61	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
19.15	0.3	1.02	1	1.019	1	1.030	1.071
6.88	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
6.98	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
7.44	0.5	1.02	1	1.000	1	1.015	1.036
16.08	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055

Tabel 4.19 Hasil Koefisien *Drag* (Lanjutan)

Koefisien Drag							
Length (m)	Gap (m)	C_D^0	$\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$	Ψ_{proxi}^{CD}	Ψ_{trench}^{CD}	Ψ_{VIV}^{CD}	C_D
4.39	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
7.68	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
12.11	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
11.89	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
11.38	0.5	1.02	1	1.000	1	1.015	1.036
10.63	0.5	1.02	1	1.000	1	1.015	1.036
10.41	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
15.54	0.7	1.02	1	1.000	1	1.015	1.036
6.73	0.3	1.02	1	1.019	1	1.015	1.055
12.65	0.2	1.02	1	1.060	1	1.014	1.096
8.63	0.1	1.02	1	1.142	1	1.014	1.181

Setelah koefisien *drag* diperoleh, gaya *drag* dapat dihitung. Beberapa parameter lain yang digunakan dalam perhitungan gaya *drag* dan hasil perhitungan gaya *drag* ditampilkan pada Tabel 4.20 berikut:

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Gaya *Drag*

Panjang <i>Span</i>	Kecepatan Total	Koefisien <i>Drag</i>	Gaya <i>Drag</i>
m	m/s	-	N/m
5.38	0.969	1.055	238.34
2.88	0.969	1.055	238.34
12.87	0.994	1.036	250.73
3.61	0.969	1.055	238.34
19.15	0.969	1.071	238.34
6.88	0.969	1.055	238.34
6.98	0.969	1.055	238.34
7.44	0.994	1.036	250.73
16.08	0.969	1.055	238.34
4.39	0.969	1.055	238.36
7.68	0.969	1.055	238.34
12.11	0.969	1.055	238.34
11.89	0.969	1.055	238.34
11.38	0.994	1.036	250.73

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Gaya *Drag* (Lanjutan)

GAYA DRAG			
Panjang <i>Span</i>	Kecepatan Total	Koefisien <i>Drag</i>	Gaya <i>Drag</i>
m	m/s	-	N/m
10.63	0.994	1.036	250.73
10.41	0.969	1.055	238.34
15.54	1.013	1.036	260.32
6.73	0.969	1.055	238.34
12.65	0.953	1.096	230.44
8.63	0.933	1.181	220.66

4.5.2 Perhitungan Gaya *Lift*

Gaya *lift* atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Beberapa parameter yang digunakan untuk perhitungan Gaya *Lift* ditampilkan pada Tabel 4.21 berikut:

Tabel 4.21 Parameter Perhitungan Gaya *Lift*

Gaya Lift			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Diameter Total Pipa	D_t	0.469	m
Koefisien Lift	C_L	0.7	-

Beberapa parameter tambahan dan perhitungan Gaya *Lift* ditampilkan pada Tabel 4.22

Tabel 4.22 Perhitungan Gaya *Lift*

GAYA LIFT							
<i>Span</i>	Gap	Kecepatan Total		Koefisien Gaya <i>Lift</i>		Gaya <i>Lift</i>	
		10 Tahun	100 Tahun	10 Tahun	100 Tahun	10 Tahun	100 Tahun
m	m	m/s	m/s	m/s	m/s	N/m	N/m
5.38	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
2.88	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
12.87	0.5	0.49	0.99	0.75	0.7	43.05	166.35

Tabel 4.22 Perhitungan Gaya *Lift* (Lanjutan)

GAYA LIFT							
<i>Span</i>	<i>Gap</i>	Kecepatan Total		Koefisien Gaya <i>Lift</i>		Gaya <i>Lift</i>	
		10 Tahun	100 Tahun	10 Tahun	100 Tahun	10 Tahun	100 Tahun
m	m	m/s	m/s	m/s	m/s	N/m	N/m
3.61	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
19.15	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
6.88	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
6.98	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
7.44	0.5	0.49	0.99	0.75	0.7	43.05	166.35
16.08	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
4.39	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.14
7.68	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
12.11	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.71	158.13
11.89	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
11.38	0.5	0.49	0.99	0.75	0.7	43.05	166.35
10.63	0.5	0.49	0.99	0.75	0.7	43.05	166.35
10.41	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
15.54	0.7	0.5	1.01	0.74	0.7	44.34	172.71
6.73	0.3	0.48	0.97	0.76	0.7	41.34	158.13
12.65	0.2	0.47	0.95	0.77	0.7	40.22	152.89
8.63	0.1	0.45	0.93	0.78	0.7	38.80	146.40

4.5.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

Gaya Hidrodinamis Total yang digunakan merupakan hasil penjumlahan dari Gaya *Drag* dan Gaya *Lift*. Nilai Gaya hidrodinamis total ditampilkan pada Tabel 4.23

Tabel 4.23 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

GAYA HIDRODINAMIS TOTAL				
Panjang <i>Span</i>	<i>Gap</i>	Gaya <i>Drag</i>	Gaya <i>Lift</i>	Gaya Hidrodinamis Total
m	m	N/m	N/m	N/m
5.38	0.3	238.34	158.13	396.47
2.88	0.3	238.34	158.13	396.47
12.87	0.5	250.74	166.35	417.09

Tabel 4.23 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

GAYA HIDRODINAMIS TOTAL				
Panjang Span	Gap	Gaya Drag	Gaya Lift	Gaya Hidrodinamis Total
m	m	N/m	N/m	N/m
3.61	0.3	238.34	158.13	396.47
19.15	0.3	238.34	158.13	396.47
6.88	0.3	238.34	158.13	396.47
6.98	0.3	238.34	158.13	396.47
7.44	0.5	250.74	166.35	417.09
16.08	0.3	238.34	158.13	396.47
4.39	0.3	238.36	158.14	396.51
7.68	0.3	238.34	158.13	396.47
12.11	0.3	238.34	158.13	396.47
11.89	0.3	238.34	158.13	396.47
11.38	0.5	250.74	166.35	417.09
10.63	0.5	250.74	166.35	417.09
10.41	0.3	238.34	158.13	396.47
15.54	0.7	260.32	172.71	433.04
6.73	0.3	238.34	158.13	396.47
12.65	0.2	230.45	152.89	383.34
8.63	0.1	220.67	146.40	367.07

4.6 Analisis Panjang Bentangan (*Free span analysis*)

Analisis panjang *span* menggunakan *code* DNV GL RP F-105 merupakan analisis *span* pada pipa bawah laut yang menggunakan beberapa parameter yang lebih kompleks.

4.6.1 *Boundary Condition*

Sebelum Panjang Span Efektif, *Effective Axial Force*, *Critical Buckling Load* dan *Static Deflection* dihitung asumsi tumpuan bentangan bebas perlu ditentukan terlebih dahulu. Asumsi tumpuan yang efektif digunakan untuk kasus bentangan bebas ini adalah *fixed-fixed*. Nilai koefisien *boundary condition* dari *fixed-fixed span* menurut DNV GL RP F-105 yang dijelaskan kembali dalam Tabel 4.24

Tabel 4.24 Koefisien *Boundary Condition* (DNV GL RP F 105, 2017)

	<i>Pinned-pinned</i> ⁽²⁾	<i>Fixed-fixed</i> ⁽³⁾	<i>Single Span on seabed</i>
C ₁	1.57	3.56	3.56
C ₂	1.0	4.0	4.0
C ₃	0.8 ⁽¹⁾	0.2 ⁽¹⁾	0.4 ⁽¹⁾
C ₄	4.93	14.1	Shoulder: $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ Midspan: 8.6
C ₅	1/8	1/12	Shoulder ⁽⁴⁾ : $14.1 (L/L_{eff})^2$ Midspan: 8.6
C ₆	5/384	1/384	1/384
1) Note that C ₃ = 0 is normally assumed for in-line direction if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} shall be replaced by L in all expressions, including the expression for P_{cr} . 3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition. 4) C ₅ shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.			

4.6.2 Analisis *Dynamic Soil Stiffness* dan Panjang *Allowable Span* Kritis

Panjang efektif bentangan bebas pipa dapat mempengaruhi frekuensi natural pipa terutama bentangan bebas pipa yang diasumsikan dengan tumpuan *span on seabed* dan *fixed-fixed*. Nilai panjang *free span* efektif juga bergantung pada nilai *Relative Soil Stiffness Number*. Tabel 4.25 dibawah ini merupakan parameter perhitungan *dynamic soil stiffness* untuk mengetahui besar gaya dari interaksi tanah dengan pipa.

Tabel 4.25 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> vertikal	C _v	10500	kN/m ^{5/2}
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> horizontal	C _L	9000	kN/m ^{5/2}
<i>Poisson ratio</i> tanah vertical/horizontal (corroded)	v _{soil}	0.35	-
Massa pipa di udara	-	334.74	kg/m
Massa air yang dipindahkan	mdisp	177.23	kg/m

Untuk mengetahui besar gaya interaksi tanah dengan pipa maka dilakukan perhitungan untuk menghitung gaya kekakuan dari tanah itu sendiri yang mana hasil dari perhitungan tersebut akan digunakan untuk menentukan panjang span kritis dari *span* yang terjadi. Tabel 4.26 dibawah ini menampilkan perhitungan kekakuan tanah dinamis untuk pipa yang berinteraksi dengan tumpuan yang berupa *fixed-fixed*.

Tabel 4.26 Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness*

<i>Dynamic Soil Stiffness</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Rasio massa spesifik	ρ_s/ρ	1.889	-
<i>Dynamic soil stiffness</i> vertikal	K_v	17621.27	kN/m ²
<i>Dynamic soil stiffness</i> horizontal	K_L	13253.71	kN/m ²

Studi kasus yang digunakan pada tugas akhir ini adalah pipa yang telah dilakukan survei *freespan* sebelumnya, sehingga panjang span yang digunakan merupakan panjang span aktual.

Oleh karena hal ini, panjang efektif bentangan bebas yang dihitung berdasarkan panjang tiap – tiap span aktualnya. Berikut adalah parameter yang digunakan untuk melakukan perhitungan panjang efektif ditampilkan pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27 Parameter Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Dynamic Soil Stiffness</i> Vertikal	K_v	1.76×10^7	N/m ²
<i>Dynamic Soil Stiffness</i> Horizontal	K_L	1.33×10^7	N/m ²
<i>Concrete Stiffness Factor</i>	CSF	0.331	-
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	2.24×10^{-4}	m ⁴
<i>Young's Modulus</i> Pipa Baja	E_{st}	2.07×10^{11}	Pa

Sehingga dihasilkan nilai panjang *free span* efektif untuk tiap tiap bagian pipa yang terdapat *free span* untuk 2 kondisi, yaitu kondisi *in line*

dan kondisi *cross-flow*. Nilai panjang *free span* efektif untuk 2 kondisi ditampilkan pada Tabel 4.28 berikut:

Tabel 4.28 Perhitungan Panjang *Span* Efektif untuk Kondisi *In-Line* dan *Cross-Flow*

Cross-Flow				In-Line			
Panjang <i>span</i>	β	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif	Panjang <i>span</i>	β	L_{eff}/L	Panjang <i>span</i> Efektif
m			m	m			m
5.38	2.38	1.78	9.59	5.38	2.26	1.85	9.94
2.88	1.29	2.56	7.36	2.88	1.17	2.68	7.73
12.87	3.90	1.31	16.90	12.87	3.77	1.34	17.21
3.61	1.68	2.22	8.01	3.61	1.56	2.32	8.36
19.15	4.59	1.21	23.11	19.15	4.46	1.22	23.42
6.88	2.81	1.59	10.95	6.88	2.68	1.63	11.24
6.98	2.83	1.58	11.04	6.98	2.71	1.63	11.35
7.44	2.94	1.55	11.50	7.44	2.82	1.59	11.81
16.08	4.28	1.25	20.08	16.08	4.16	1.27	20.39
4.39	2.03	1.99	8.71	4.39	1.90	2.07	9.06
7.68	2.99	1.53	11.74	7.68	2.87	1.57	12.05
12.11	3.79	1.33	16.15	12.11	3.67	1.36	16.45
11.89	3.76	1.34	15.93	11.89	3.63	1.37	16.23
11.38	3.68	1.36	15.43	11.38	3.56	1.38	15.73
10.63	3.56	1.38	14.68	10.63	3.44	1.41	14.98
10.41	3.53	1.39	14.45	10.41	3.40	1.42	14.75
15.54	4.22	1.26	19.55	15.54	4.10	1.28	19.86
6.73	2.77	1.61	10.80	6.73	2.64	1.65	11.11
12.65	3.87	1.32	16.69	12.65	3.74	1.34	16.99
8.63	3.20	1.47	12.68	8.63	3.08	1.50	12.98

4.6.3 Effective Axial Forces

Effective axial force dapat mempengaruhi besar frekuensi pipa bawah laut. Parameter yang digunakan untuk perhitungan ini dijelaskan pada Tabel 4.29 dan Tabel 4.30.

Tabel 4.29 Parameter Perhitungan *Effective Axial Forces*

Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Perbedaan Tekanan	ΔP	$9.42E \times 10^6$	Pa
<i>Poisson's Ratio</i> Baja	ν_{st}	0.3	-
Diameter Dalam Pipa	D_i	0.327	m
Luas Penampang Internal Pipa Baja	A_i	0.08	m ²
Luas Penampang Pipa Baja	A_{st}	1.53×10^{-2}	m ²
Koefisien <i>Thermal Expansion</i>	α_e	1.17×10^{-5}	/ ⁰ C
Temperatur Operasi	T_1	65	⁰ C
Temperatur Air Laut	T_0	25	⁰ C
<i>Young's Modulus</i> Pipa Baja	E_{st}	2.07×10^{11}	Pa

Tabel 4.30 Perhitungan Nilai Perbedaan Tekanan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas air laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Tekanan Internal Desain	P_i	9.93×10^6	Pa
Tekanan eksternal	P_e	5.14×10^5	Pa
Perbedaan tekanan	ΔP	9.42×10^6	Pa

Perhitungan *effective axial force* juga menambahkan parameter perbedaan tekanan (P) yang merupakan pengurangan antara tekanan internal pipa dan tekanan di luar pipa yang berupa tekanan hidrostatik. Perbedaan tekanan dihitung sehingga menghasilkan nilai P sesuai dengan Tabel 4.33. Dari Parameter yang telah ditentukan di atas diperoleh hasil *effective axial force* sebesar $-1.8E+06$ Newton.

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Effective Axial Force	S_{eff}	-1.8×10^6	N

4.6.4 Critical Buckling Load

Critical Buckling Load merupakan faktor yang mempengaruhi frekuensi natural pipa bawah laut. Perhitungan beban *buckling* kritis juga untuk menentukan berapa besar gaya untuk terjadinya *buckling* dari pipa itu sendiri berdasarkan panjang *span* yang ditinjau. Selain panjang bentangan, beberapa parameter yang digunakan untuk perhitungan *critical buckling load* ditampilkan dalam Tabel 4.31

Tabel 4.31 Parameter Perhitungan *Critical Buckling Load*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.331	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07×10^{11}	Pa
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	2.24×10^{-4}	m^4
Boundary condition	C_2	4.00	-

Nilai *Critical Buckling Load* untuk arah *in-line* dan *cross-flow* ditampilkan pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Nilai *Critical Buckling Load* untuk Kondisi *In-line* dan *Cross-Flow*

<i>Cross-Flow</i>			<i>In-Line</i>		
<i>Span</i>	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	<i>Span</i>	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>
m	m	N	m	m	N
5.38	9.58	2.65×10^7	5.38	9.94	2.46×10^7
2.88	7.36	4.48×10^7	2.88	7.73	4.08×10^7
12.87	16.90	8.51×10^6	12.87	17.21	8.22×10^6
3.61	8.01	3.79×10^7	3.61	8.36	3.48×10^7
19.15	23.11	4.55×10^6	19.15	23.42	4.43×10^6
6.88	10.95	2.03×10^7	6.88	11.24	1.93×10^7
6.98	11.04	1.99×10^7	6.98	11.35	1.89×10^7
7.44	11.50	1.84×10^7	7.44	11.81	1.75×10^7
16.08	20.08	6.03×10^6	16.08	20.39	5.85×10^6
4.39	8.71	3.21×10^7	4.39	9.06	2.96×10^7
7.68	11.74	1.76×10^7	7.68	12.05	1.68×10^7
12.11	16.15	9.33×10^6	12.11	16.45	8.99×10^6
11.89	15.93	9.58×10^6	11.89	16.23	9.23×10^6
11.38	15.43	1.02×10^7	11.38	15.73	9.83×10^6
10.63	14.68	1.13×10^7	10.63	14.98	1.08×10^7
10.41	14.45	1.16×10^7	10.41	14.75	1.12×10^7

Tabel 4.32 Nilai *Critical Buckling Load* untuk Kondisi *In-line* dan *Cross-Flow* (lanjutan)

<i>Cross-Flow</i>			<i>In-Line</i>		
<i>Span</i>	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	<i>Span</i>	Panjang span efektif	<i>Critical Buckling Load</i>
m	m	N	m	m	N
15.54	19.55	6.36×10^6	15.54	19.86	6.17×10^6
6.73	10.80	2.09×10^7	6.73	11.11	1.97×10^7
12.65	16.69	8.74×10^6	12.65	16.99	8.43×10^6
8.63	12.68	1.51×10^7	8.63	12.98	1.44×10^7

4.6.5 Static Deflection

Static Deflection dipengaruhi oleh panjang efektif bentangan bebas pipa dan beban defleksi. Beban defleksi untuk arah *in-line* adalah total gaya hidrodinamis, sedangkan untuk arah *cross-flow* adalah berat terendam pipa. Selain itu, beberapa parameter lain yang digunakan untuk memperoleh *static deflection* ditampilkan dalam Tabel 4.33.

Tabel 4.33 Parameter Perhitungan *Static Deflection*

Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07×10^{11}	Pa
Boundary condition	C_6	0.0026	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-1.80×10^6	N
Berat terendam pipa (<i>q cross-flow</i>)	W_{sub}	1545.20	N/m

Sehingga *static deflection* dapat ditentukan, dan hasilnya dijelaskan dalam Tabel 4.34 dan Tabel 4.35.

Tabel 4.34 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>				
Panjang span	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Gaya Hidrodinamis	Defleksi statis
m	m	N		m
5.38	9.94	2.46×10^7	347.41	1.06×10^{-4}
2.88	7.73	4.08×10^7	347.41	3.75×10^{-5}

Tabel 4.34 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *In-Line* (lanjutan)

In-Line				
Panjang <i>span</i>	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Gaya Hidrodinamis	Defleksi statis
m	m	N		m
12.87	17.21	8.22×10^6	360.03	1.19×10^{-3}
3.61	8.36	3.48×10^7	347.41	5.1×10^{-5}
19.15	23.42	4.43×10^6	360.03	5.10×10^{-3}
6.88	11.24	1.93×10^7	347.41	1.77×10^{-4}
6.98	11.35	1.89×10^7	347.41	1.85×10^{-4}
7.44	11.81	1.75×10^7	360.03	2.30×10^{-4}
16.08	20.39	5.85×10^6	347.41	2.51×10^{-3}
4.39	9.06	2.96×10^7	347.42	7.23×10^{-5}
7.68	12.05	1.68×10^7	347.41	2.38×10^{-4}
12.11	16.45	8.99×10^6	347.41	9.22×10^{-4}
11.89	16.23	9.23×10^6	347.41	8.69×10^{-4}
11.38	15.73	9.83×10^6	360.03	7.94×10^{-4}
10.63	14.98	1.08×10^7	360.03	6.39×10^{-4}
10.41	14.75	1.12×10^7	347.41	5.69×10^{-4}
15.54	19.86	6.17×10^6	360.03	2.42×10^{-3}
6.73	11.11	1.97×10^7	370.17	1.69×10^{-4}
12.65	16.99	8.43×10^6	360.02	1.03×10^{-3}
8.63	12.98	1.44×10^7	347.41	3.03×10^{-4}

Tabel 4.35 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *Cross-Flow*

Cross-Flow			
Panjang <i>span</i>	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Defleksi statis
m	m	N	m
5.38	9.58	2.65×10^7	5.91×10^{-4}
2.88	7.36	4.48×10^7	2.00×10^{-4}
12.87	16.90	8.51×10^6	6.76×10^{-3}
3.61	8.01	3.79×10^7	2.82×10^{-4}
19.15	23.11	4.55×10^6	3.08×10^{-2}
6.88	10.95	2.03×10^7	1.03×10^{-3}

Tabel 4.35 Hasil Perhitungan *Static Deflection* Kondisi *Cross-Flow* (Lanjutan)

Cross-Flow			
Panjang <i>span</i>	Panjang efektif	<i>Critical Buckling Load</i>	Defleksi statis
m	m	N	m
6.98	11.04	1.99×10^7	1.07×10^{-3}
7.44	11.50	1.84×10^7	1.27×10^{-3}
16.08	20.08	6.03×10^6	1.51×10^{-2}
4.39	8.71	3.21×10^7	3.98×10^{-4}
7.68	11.74	1.76×10^7	1.38×10^{-3}
12.11	16.15	9.33×10^6	5.50×10^{-3}
11.89	15.93	9.58×10^6	5.18×10^{-3}
11.38	15.43	1.02×10^7	4.49×10^{-3}
10.63	14.68	1.13×10^7	3.60×10^{-3}
10.41	14.45	1.16×10^7	3.37×10^{-3}
15.54	19.55	6.36×10^6	1.33×10^{-2}
6.73	10.80	2.09×10^7	9.71×10^{-4}
12.65	16.69	8.74×10^6	6.38×10^{-3}
8.63	12.68	1.51×10^7	1.92×10^{-3}

4.6.6 Frekuensi Natural Pipa

Frekuensi natural pipa merupakan parameter penting yang harus ditentukan karena parameter ini digunakan sebagai tolak ukur penentuan panjang maksimum bentangan bebas pipa bawah laut yang boleh terjadi. Jika frekuensi natural pipa bawah laut mendekati frekuensi *vortex shedding* yang terjadi di daerah pipa, maka pipa akan mengalami getaran yang dapat mengakibatkan kegagalan kelelahan pada pipa.

Frekuensi natural pipa dihitung menggunakan persamaan yang membutuhkan beberapa parameter yang telah ditentukan dan dihitung sebelumnya. Parameter ditampilkan dalam Tabel 4.36

Tabel 4.36 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Parameter Perhitungan <i>Fundamental Natural Frequency</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Boundary condition	C ₁	3.56	-
	C ₃	0.20	-
Effective Axial Force	S _{eff}	-1.8 x 10 ⁶	N
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.33	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E _{st}	2.07 x 10 ¹¹	Pa
momen inersia pipa baja	I _{st}	2.24 x 10 ⁻⁴	m ⁴

Frekuensi natural pipa kemudian dihitung dari setiap bentangan bebas aktual yang ada untuk kondisi *in-line* dan *cross-flow* yang hasilnya dijelaskan pada Tabel 4.37 dan Tabel 4.38.

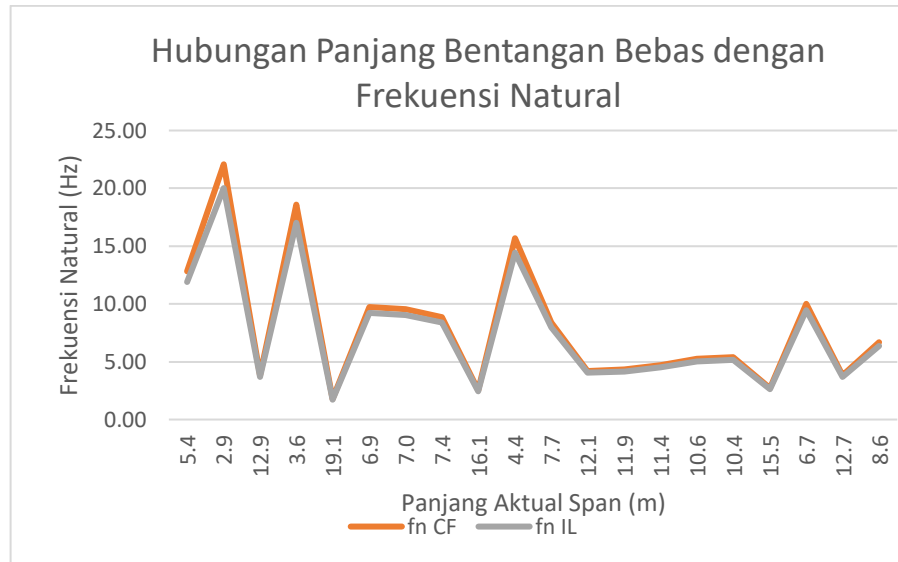
Tabel 4.37 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
9.945	2.46 x 10 ⁷	1.06 x 10 ⁻⁴	11.90
7.726	4.08 x 10 ⁷	3.75 x 10 ⁻⁵	20.02
17.206	8.22 x 10 ⁶	1.19E x 10 ⁻³	3.69
8.362	3.48 x 10 ⁷	5.19 x 10 ⁻⁵	17.02
23.421	4.43 x 10 ⁶	5.10 x 10 ⁻³	1.72
11.239	1.93 x 10 ⁷	1.77 x 10 ⁻⁴	9.21
11.350	1.89 x 10 ⁷	1.85 x 10 ⁻⁴	9.02
11.806	1.75 x 10 ⁷	2.30 x 10 ⁻⁴	8.39
20.389	5.85 x 10 ⁶	2.51 x 10 ⁻³	2.45
9.061	2.96 x 10 ⁷	7.23 x 10 ⁻⁵	14.43
12.047	1.68 x 10 ⁷	2.38 x 10 ⁻⁴	7.96
16.449	8.99 x 10 ⁶	9.22 x 10 ⁻⁴	4.04
16.235	9.23 x 10 ⁶	8.69 x 10 ⁻⁴	4.16
15.729	9.83 x 10 ⁶	7.94 x 10 ⁻⁴	4.51
14.977	1.08 x 10 ⁷	6.39 x 10 ⁻⁴	5.03
14.754	1.12 x 10 ⁷	5.69 x 10 ⁻⁴	5.14
19.860	6.17E x 10 ⁶	2.42 x 10 ⁻⁴	2.63
11.108	1.97E x 10 ⁷	1.69 x 10 ⁻⁴	9.44
16.989	8.43 x 10 ⁶	1.03 x 10 ⁻³	3.68
12.983	1.44 x 10 ⁷	3.03 x 10 ⁻⁴	6.37

Tabel 4.38 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Kondisi *Cross-Flow*

Cross-Flow			
Panjang Span Kritis	Critical Buckling Load	Defleksi statis	Frekuensi Natural Pipa
m	N	m	Hz
9.585	2.65×10^7	5.91×10^{-4}	12.84
7.364	4.48×10^7	2.00×10^{-4}	22.08
16.902	8.51×10^6	6.76×10^{-3}	3.84
8.008	3.79×10^7	2.82×10^{-4}	18.60
23.109	4.55×10^6	3.08×10^{-2}	1.78
10.948	2.03×10^7	1.03×10^{-3}	9.73
11.043	1.99×10^7	1.07×10^{-3}	9.56
11.501	1.84×10^7	1.27×10^{-3}	8.87
20.080	6.03×10^6	1.51×10^{-2}	2.54
8.707	3.21×10^7	3.98×10^{-4}	15.66
11.742	1.76×10^7	1.38×10^{-3}	8.40
16.146	9.33×10^6	5.50×10^{-3}	4.21
15.932	9.58×10^6	5.18×10^{-3}	4.34
15.427	1.02×10^7	4.49×10^{-3}	4.71
14.676	1.13×10^7	3.60×10^{-3}	5.26
14.453	1.16×10^7	3.37×10^{-3}	5.38
19.552	6.36×10^6	1.33×10^{-3}	2.74
10.795	2.09×10^7	9.71×10^{-4}	10.02
16.685	8.74×10^6	6.38×10^{-3}	3.83
12.681	$1.51\text{E}+07$	1.92×10^{-3}	6.7

Dari hasil perhitungan frekuensi natural pipa didapatkan hubungan antara panjang bentangan pipa dengan frekuensi natural pipa dalam kondisi *in-line* maupun *cross-flow*, grafik menunjukkan bahwa pada panjang span terkecil memiliki frekuensi natural pipa yang besar, dan sebaliknya. Grafik dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Panjang *freespan* dengan Frekuensi Natural Pipa.

4.7 Screening Kriteria VIV, Kelelahan, dan Panjang Span

Screening panjang span menurut DNV GL RP F-105 ada 2 tahap, yaitu *screening level 1* yang ditujukan untuk mengetahui panjang yang diijinkan pipa untuk terjadi bentangan. *Screening* tahap awal ini untuk asumsi bahwa pipa tidak mengalami kegagalan secara statis. Dibawah ini merupakan Tabel 4.39 yang menunjukkan bahwa pada bentangan berapa *span* akan mengalami kegagalan statis sesuai DNV GL RP F 105.

Tabel 4.39 Perhitungan *screening* L/D pada Bentangan Pipa.

No.	Kilometre Point (km)	Gap (m)	Panjang Bentangan	L/D	Keterangan
1	11.992 - 11.998	0.3	5.38	11.47	SCREENING FATIGUE
2	12.058 - 12.061	0.3	2.88	6.14	SCREENING FATIGUE
3	12.126 - 12.14	0.5	12.87	27.43	SCREENING FATIGUE
4	12.239 - 12.243	0.3	3.61	7.68	SCREENING FATIGUE
5	12.284 - 12.302	0.3	19.15	40.81	GAGAL STATIS
6	12.34 - 12.347	0.3	6.88	14.67	SCREENING FATIGUE
7	12.397 - 12.404	0.3	6.98	14.87	SCREENING FATIGUE

Tabel 4.38 Perhitungan *screening* L/D pada Bentangan Pipa. (lanjutan)

No.	Kilometre Point (km)	Gap (m)	Panjang Bentangan	L/D	L/D <30
8	12.572 - 12.579	0.5	7.44	15.86	SCREENING FATIGUE
9	12.6 - 12.616	0.3	16.08	34.27	GAGAL STATIS
10	12.625 - 12.628	0.3	4.39	9.35	SCREENING FATIGUE
11	12.631 - 12.638	0.3	7.68	16.38	SCREENING FATIGUE
12	12.647 - 12.659	0.3	12.11	25.81	SCREENING FATIGUE
13	12.697 - 12.709	0.3	11.89	25.35	SCREENING FATIGUE
14	12.723 - 12.735	0.5	11.38	24.26	SCREENING FATIGUE
15	12.736 - 12.747	0.5	10.63	22.66	SCREENING FATIGUE
16	12.768 - 12.778	0.3	10.41	22.18	SCREENING FATIGUE
17	12.806 - 12.821	0.7	15.54	33.13	GAGAL STATIS
18	12.828 - 12.836	0.3	6.73	14.34	SCREENING FATIGUE
19	12.857 - 12.869	0.2	12.65	26.96	SCREENING FATIGUE
20	12.993 - 13.002	0.1	8.63	18.39	SCREENING FATIGUE

Setelah mendapatkan hasil *screening* untuk mengetahui berapa panjang span yang mengalami gagal statis, maka langkah selanjutnya adalah melakukan *screening* kriteria *fatigue*. Pada Tabel 4.40 merupakan parameter yang digunakan untuk *screening* arah *in-line* dan *cross-flow*.

Tabel 4.40 Parameter *Screening Fatigue*

<i>Safety Factor</i>	<i>Safety Class</i>		
	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

Screening kriteria VIV dalam studi kasus Tugas akhir ini untuk mengetahui bentang bebas yang mengalami VIV yang ditentukan oleh DNV

GL RP F105. Tabel 4.40 menampilkan *screening* kriteria VIV pada bentang bebas yang ditinjau.

Tabel 4.40.1 *Screening* Kriteria VIV (*In-Line*)

Panjang <i>Span</i>	$f_{n, IL}$	$V_{R^{IL}}^{onset}$	Kecepatan Arus Ekstrem	Ruas Kanan \square	Kriteria VIV
m	Hz		m/s		
5.38	11.90	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
2.88	20.02	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
12.87	3.69	1.193	0.994	1.953	TIDAK VIV
3.61	17.02	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
19.15	1.72	1.207	0.969	1.882	VIV
6.88	9.21	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
6.98	9.02	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
7.44	8.39	1.193	0.994	1.953	TIDAK VIV
16.08	2.45	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
4.39	14.43	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
7.68	7.96	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
12.11	4.04	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
11.89	4.16	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
11.38	4.51	1.193	0.994	1.953	TIDAK VIV
10.63	5.03	1.193	0.994	1.953	TIDAK VIV
10.41	5.14	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
15.54	2.63	1.193	1.013	1.990	TIDAK VIV
6.73	9.44	1.207	0.969	1.882	TIDAK VIV
12.65	3.68	1.236	0.953	1.807	TIDAK VIV
8.63	6.37	1.295	0.933	1.688	TIDAK VIV

Tabel 4.40.2 *Screening* Kriteria VIV (*Cross-flow*)

Panjang <i>Span</i>	$f_{n, IL}$	$V_{R^{CF}}^{onset}$	Kecepatan Arus Ekstrem	Ruas Kanan \square	Kriteria VIV
m	Hz		m/s		
5.38	12.8	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
2.88	22.1	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
12.87	3.8	2.50	0.994	1.796	TIDAK VIV
3.61	18.6	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
19.15	1.78	2.40	0.969	1.818	VIV

Tabel 4.40.2 Screening Kriteria VIV (Cross-flow)

Panjang Span	$f_{n, IL}$	$V_R^{CF_{onset}}$	Kecepatan Arus Ekstrem	Ruas Kanan \square	Kriteria VIV
m	Hz		m/s		
6.88	9.7	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
6.98	9.6	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
7.44	8.9	2.50	0.994	1.796	TIDAK VIV
16.08	2.5	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
4.39	15.7	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
7.68	8.4	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
12.11	4.2	2.40	0.969	1.824	TIDAK VIV
11.89	4.3	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
11.38	4.7	2.50	0.994	1.796	TIDAK VIV
10.63	5.3	2.50	0.994	1.796	TIDAK VIV
10.41	5.4	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
15.54	2.7	2.50	1.013	1.834	TIDAK VIV
6.73	10.0	2.40	0.969	1.818	TIDAK VIV
12.65	3.8	2.27	0.953	1.888	TIDAK VIV
8.63	6.7	2.13	0.933	1.957	TIDAK VIV

Setelah mengetahui kriteria bentangan bebas yang mengalami VIV, maka *step* selanjutnya yang diperlukan adalah melakukan *screening* kriteria *fatigue*, langkah berikutnya adalah melakukan *screening* dengan mengelompokkan ruas kanan dan kiri yang akan dibandingkan untuk arah *in-line* dan untuk arah *cross-flow*. Tabel 4.41 dan Tabel 4.42 merupakan hasil *screening* untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*. Pada kedua Tabel tersebut terdapat keterangan “LOLOS” yang berarti panjang *freespan* tersebut lolos *screening* dan “TIDAK LOLOS” yang berarti sebaliknya.

Tabel 4.41 Perhitungan *Screening* Kelelahan Kondisi *In-Line*

In-Line							
L	$f_{n, IL}$	$f_{n, IL} / \gamma_{IL}$	$V_{R^{IL}}^{\text{onset}}$	Uc 100 year	α	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s			
5.38	11.90	10.82	1.21	0.85	0.998	1.44	LOLOS
2.88	20.02	18.20	1.21	0.85	0.998	1.47	LOLOS
12.87	3.69	3.35	1.19	0.88	0.998	1.40	LOLOS
3.61	17.02	15.47	1.21	0.85	0.998	1.46	LOLOS
19.15	1.72	1.56	1.21	0.85	0.998	1.26	TIDAK LOLOS
6.88	9.21	8.37	1.21	0.85	0.998	1.42	LOLOS
6.98	9.02	8.20	1.21	0.85	0.998	1.42	LOLOS
7.44	8.39	7.63	1.19	0.88	0.998	1.47	LOLOS
16.08	2.45	2.22	1.21	0.85	0.998	1.30	LOLOS
4.39	14.43	13.11	1.21	0.85	0.998	1.45	LOLOS
7.68	7.96	7.23	1.21	0.85	0.998	1.41	LOLOS
12.11	4.04	3.67	1.21	0.85	0.994	1.35	LOLOS
11.89	4.16	3.78	1.21	0.85	0.998	1.35	LOLOS
11.38	4.51	4.10	1.19	0.88	0.998	1.42	LOLOS
10.63	5.03	4.57	1.19	0.88	0.998	1.43	LOLOS
10.41	5.14	4.67	1.21	0.85	0.998	1.37	LOLOS
15.54	2.63	2.40	1.19	0.89	0.998	1.39	LOLOS

Berdasarkan hasil *screening* kriteria statis didapatkan 17 bentangan yang lolos untuk dilakukan analisis umur kelelahan, 3 bentangan mengalami kegagalan statis dengan masing-masing panjang 19.15m, 16.08 m, dan 15.54 m. Sementara untuk *screening* VIV dan *screening* kriteria *fatigue* bentangan dengan panjang 19.15 m mengalami VIV dan gagal lolos pada *screening* kriteria kelelahan.

Tabel 4.42 Perhitungan *Screening* Kelelahan Kondisi *Cross-Flow*

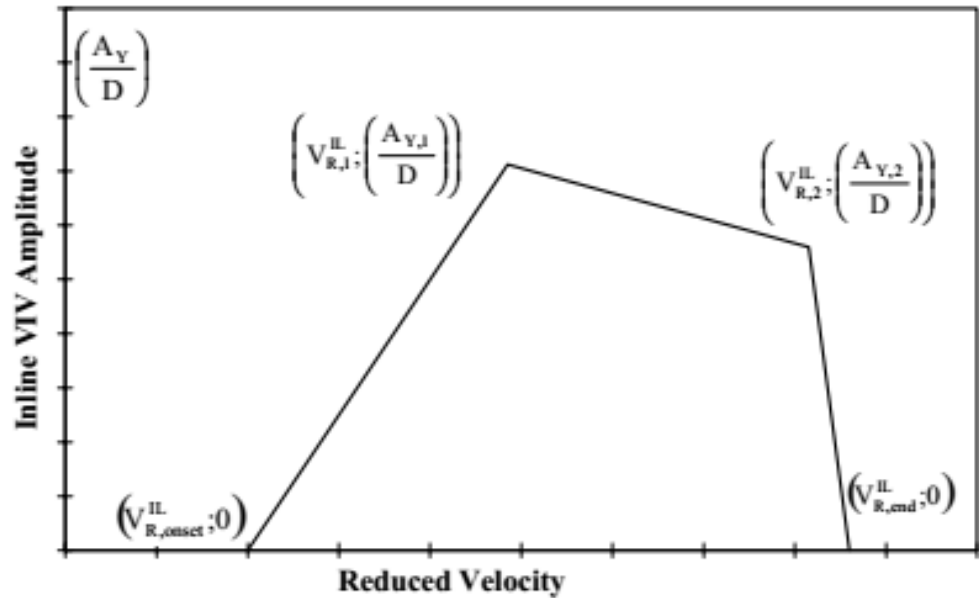
Cross-Flow							
L	$f_{n, CF}$	$f_{n, CF} / \gamma_{CF}$	$V_{Rcfonset}$	Uc 100 year	U _w 10 year	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s	m/s		
5.38	12.84	10.70	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
2.88	22.08	18.40	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
12.87	3.84	3.20	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
3.61	18.60	15.50	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
19.15	1.78	1.48	2.40	0.85	0.002	0.76	TIDAK LOLOS
6.88	9.73	8.11	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
6.98	9.56	7.97	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
7.44	8.87	7.39	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
16.08	2.54	2.12	2.40	0.85	0.002	0.76	TIDAK LOLOS
4.39	15.66	13.05	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
7.68	8.40	7.00	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
12.11	4.21	3.51	2.40	0.85	0.005	0.76	LOLOS
11.89	4.34	3.62	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
11.38	4.71	3.93	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
10.63	5.26	4.38	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
10.41	5.38	4.48	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
15.54	2.74	2.28	2.50	0.89	0.002	0.76	TIDAK LOLOS
6.73	10.02	8.35	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
12.65	3.83	3.19	2.27	0.83	0.002	0.79	LOLOS
8.63	6.70	5.58	2.13	0.81	0.002	0.82	LOLOS

Berdasarkan hasil screening kriteria untuk fatigue didapatkan 17 bentangan yang lolos untuk dilakukan analisis umur kelelahan dalam kondisi *cross-flow*, dan 3 mengalami kegagalan statis dengan masing-masing panjang 19.15m, 16.08 m, dan 15.54 m dengan masing masing gap adalah 0.3 m, 0.7 m dan 0.3m . Dalam studi kasus tugas akhir ini, 3 bentangan terpanjang tidak dilakukan analisis kelelahan karena mengalami kegagalan statis. Untuk yang tidak memenuhi direkomendasikan untuk dihitung lebih lanjut atau diretifikasi atau dilakukan koreksi oleh perusahaan.

4.8 Analisis *Stress Range* Bentangan Bebas Pipa

4.8.1 In-Line Response Model

Respon amplitudo utamanya tergantung pada reduced velocity, stability parameter, turbulency intensity, sudut aliran relative pada pipa. In-Line VIV menyebabkan rentang tegangan dengan konstruksi nilai reduced velocity onset pada gambar berikut:



Gambar 4.3 Prinsip umum Respon Model In-Line

Dengan response model dapat dikonstruksi dengan menggunakan koordinat parameter pada Tabel 4.43 dibawah berikut:

Tabel 4.43 Parameter *Response Model In-Line*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$R_{l\theta}$	0.86
$R_{2\theta}$	0.47
$\frac{A_{y,1}}{D}$	0.061
$\frac{A_{y,2}}{D}$	0.036
$V_{r,onset}^{IL}$	1.207
$V_{r,1}^{IL}$	1.82
$V_{r,2}^{IL}$	3.84
$V_{r,end}^{IL}$	3.91

Faktor reduksi, $R_{I\theta,1}(I_c, \theta_{rel})$ dan $R_{I\theta,2}(I_c)$, dihitung untuk efek dari turbulence intensity dan angle of attack dari aliran. Sehingga untuk nilai reduced velocity onset dari bentangan adalah pada Tabel 4.44 sebagai berikut:

Tabel 4.44 *Reduced Velocity onset kondisi Inline*

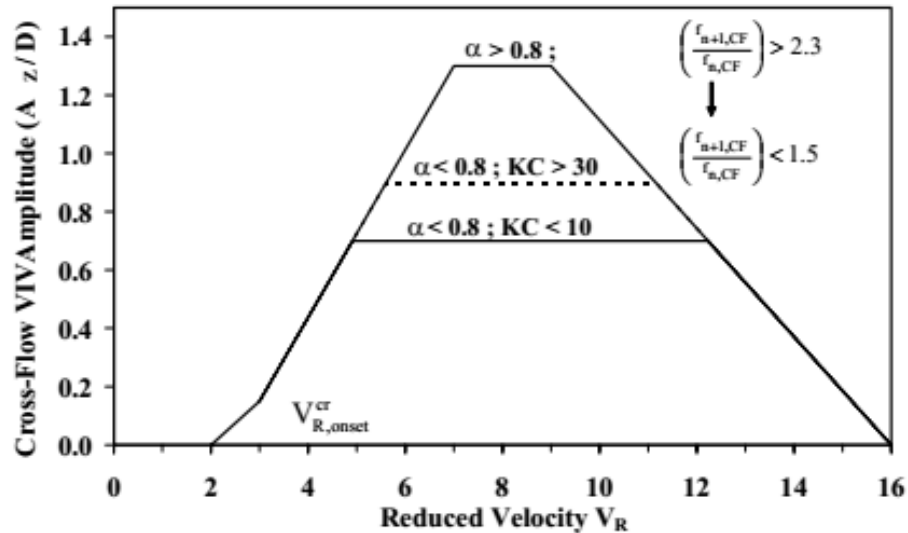
Panjang span (m)	Nilai stabilitas Parameter K_{sd}	Reduced Velocity	$V_{R^{IL}}^{onset}$	Ay/D
5.38	0.728	4.969	1.207	0.001
2.88	0.728	4.969	1.207	0.001
12.87	0.713	5.097	1.193	0.001
3.61	0.728	4.969	1.207	0.001
19.15	0.728	4.969	1.207	0.001
6.88	0.728	4.969	1.207	0.001
6.98	0.728	4.969	1.207	0.001
7.44	0.713	5.097	1.193	0.001
16.08	0.728	4.969	1.207	0.001
4.39	0.728	4.970	1.207	0.001
7.68	0.728	4.969	1.207	0.001
12.11	0.728	4.969	1.207	0.001
11.89	0.728	4.969	1.207	0.001
11.38	0.713	5.097	1.193	0.001
10.63	0.713	5.097	1.193	0.001
10.41	0.728	4.969	1.207	0.001
15.54	0.713	5.193	1.193	0.001
6.73	0.728	4.969	1.207	0.001
12.65	0.760	4.886	1.236	0.001
8.63	0.825	4.782	1.295	0.001

4.8.2 Cross-Flow response Model

Cross-flow VIV disebabkan oleh beberapa parameter seperti reduced velocity, Keulegan-Carpenter number, rasio current flow, stability parameter, rasio gap dasar laut, Strouhal number, kekasaran pipa dan lain-lain.

Untuk situasi aliran yang didominasi arus steady, onset dari cross-flow VIV untuk amplitudo signifikan terjadi secara tipikal pada nilai signifikan amplitudo VR antara 3.0 dan 4.0, dimana level getaran maksimum terjadi pada nilai terbesar Vr. Untuk pipa dengan massa spesifik

rendah, yang situasi alirannya didominasi oleh gelombang atau scenario bentangan dengan rasio gap rendah, getaran cross-flow dimulai pada VR antara 2 dan 3. *Crossflow* VIV menyebabkan rentang tegangan dengan konstruksi nilai reduced velocity onset pada gambar berikut



Gambar 4.4 Prinsip umum Respon Model *Crossflow*

Respon amplitude sebagai fungsi dari current flow ratio dan KC Dengan response model dapat dikonstruksi dengan menggunakan koordinat parameter dibawah berikut:

Tabel 4.45 Parameter *Response Model Cross flow*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$\frac{A_{z,1}}{D}$	0.9
$\frac{A_{z,2}}{D}$	0.9
$V_{r,onset}^{CF}$	2.982
$V_{r,1}^{CF}$	5.6
$V_{r,2}^{CF}$	15.51
$V_{r,end}^{CF}$	16

Nilai dari panjang bentangan untuk kondisi *cross-flow* bergantung pada nilai rasio e/D dan keulegan carpenter number dari aliran. Tabel 4.46 Berikut adalah hasil dari reduced velocity onset untuk kondisi *cross-flow*:

Tabel 4.46 *Reduced Velocity onset kondisi cross-flow*

Cross flow Reducity Velocity					
Panjang span	Rasio e/dt	$\Psi_{\text{proxi, onset}}$	$\Psi_{\text{trench, onset}}$	$V_R^{\text{CF}}_{\text{onset}}$	Az/D
5.38	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
2.88	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
12.87	1.066	1.000	1.029	2.574	0.0647
3.61	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
19.15	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
6.88	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
6.98	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
7.44	1.066	1.000	1.029	2.574	0.0647
16.08	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
4.39	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
7.68	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
12.11	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
11.89	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
11.38	1.066	1.000	1.029	2.574	0.0647
10.63	1.066	1.000	1.029	2.574	0.0647
10.41	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
15.54	1.492	1.000	1.453	3.633	0.0914
6.73	0.639	0.960	1.243	2.982	0.0750
12.65	0.426	0.907	1.349	3.058	0.0769
8.63	0.213	0.853	1.000	2.133	0.0537

4.9 Analisis Tegangan Ekivalen (*Von Mises Stress*)

4.9.1 *Hoop Stress*

Analisis *Hoop stress* pada pipa dianalisis berdasarkan ASME B31.8 dan API 5L 2000. Pada Tabel 4.47 merupakan parameter yang digunakan untuk analisis perhitungan tegangan *Hoop*.

Tabel 4.47 Parameter Perhitungan *Hoop Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa baja	D_0	0.3556	m
Tebal nominal dinding pipa	t_{nom}	0.0143	m
<i>Mill Tolerance</i>	t_{mill}	0.00179	m
Tebal dinding pipa	t	0.0095	m
Tekanan eksternal	P_e	5.14×10^5	Pa
Tekanan internal	P_i	9.9×10^6	Pa
Rasio ukuran pipa	D/t	37	-

Hasil perolehan perhitungan manual nilai *Hoop Stress* dicek dengan *Allowable Stress* yang ada pada ASME B31.8. Hasil tersebut ditampilkan pada Tabel 4.48

Tabel 4.48 Perhitungan Tegangan *Hoop*

TEGANGAN HOOP			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tegangan hoop	σ_h	116378746.49	Pa
		116.38	MPa

Dari hasil perhitungan tegangan *hoop* yang didapatkan, hasil perhitungan tersebut kemudian dicek dengan parameter ASME B31.8. Tabel 4.49 merupakan perhitungan cek ASME B31.8.

Tabel 4.49 Perhitungan Cek Batas Ijin ASME B.31.8

<i>Hoop Stress</i> (MPa)	Cek ASME (0.72xSMYS) (MPa)	Cek
116.38	259.20	AMAN

Hasil dari analisis, *hoop stress* pada pipa masih memenuhi batas yang ditentukan oleh ASME B31.8.

4.9.2 Longitudinal Stress

Tegangan *Longitudinal* sesuai yang sudah dijelaskan merupakan kombinasi dari tegangan aksial, tegangan *poisson*, tegangan *thermal* dan tegangan *bending*. Hasil penjumlahan dari tegangan aksial, tegangan *poisson* dan tegangan *thermal* menghasilkan tegangan aksial kombinasi.

Tegangan longitudinal kemudian dapat dihitung dengan menjumlahkan tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Hasil tegangan longitudinal yang digunakan adalah nilai terbesar dari penjumlahan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Setelah diperoleh, kembali dilakukan pengecekan hasil dengan *Allowable Stress* yang ada pada ASME B31.8. Semua hasil perhitungan untuk Tegangan longitudinal ditampilkan pada Tabel 4.50 berikut.

Tabel 4.50 Perhitungan Tegangan *Longitudinal*

TEGANGAN LONGITUDINAL					
Panjang Span Aktual	Tegangan				Rasio
	Aksial Kombinasi	Bending	Longitudinal		
m	MPa	MPa	MPa	MPa	
5.38	-52.03	4.33	-47.70	-56.36	0.20
2.88	-52.03	1.24	-50.79	-53.27	0.18
12.87	-52.03	24.79	-27.24	-76.82	0.27
3.61	-52.03	1.94	-50.09	-53.97	0.19
19.15	-52.03	54.80	2.77	-106.83	0.37
6.88	-52.03	7.08	-44.95	-59.11	0.21
6.98	-52.03	7.28	-44.75	-59.31	0.21
7.44	-52.03	8.29	-43.75	-60.32	0.21
16.08	-52.03	38.64	-13.39	-90.67	0.31
4.39	-52.03	2.88	-49.15	-54.91	0.19
7.68	-52.03	8.83	-43.21	-60.86	0.21
12.11	-52.03	21.92	-30.11	-73.95	0.26
11.89	-52.03	21.14	-30.89	-73.17	0.25
11.38	-52.03	19.40	-32.63	-71.43	0.25
10.63	-52.03	16.91	-35.12	-68.94	0.24
10.41	-52.03	16.19	-35.84	-68.22	0.24
15.54	-52.03	36.20	-15.83	-88.23	0.31
6.73	-52.03	6.76	-45.27	-58.80	0.20
12.65	-52.03	23.91	-28.13	-75.94	0.26
8.63	-52.03	11.11	-40.92	-63.14	0.22

Dari hasil analisis, nilai tegangan *longitudinal* pada masing masing panjang *span* aktual kemudian dicek dengan batas ijin yang diberikan yaitu 0.8x SMYS sesuai dengan ASME B31.8 pada Tabel 4.51 berikut

Tabel 4.51 Perhitungan Akumulasi Tegangan *Longitudinal*

TEGANGAN LONGITUDINAL				
Panjang Bentangan Bebas Aktual	Longitudinal maksimum	0.8 SMYS	Cek ASME B31.8	RASIO
m	Mpa	MPa		MPa
5.38	-56.36	288.00	ALLOWABLE	0.20
2.88	-53.27	288.00	ALLOWABLE	0.18
12.87	-76.82	288.00	ALLOWABLE	0.27
3.61	-53.97	288.00	ALLOWABLE	0.19
19.15	-106.83	288.00	ALLOWABLE	0.37
6.88	-59.11	288.00	ALLOWABLE	0.21
6.98	-59.31	288.00	ALLOWABLE	0.21
7.44	-60.32	288.00	ALLOWABLE	0.21
16.08	-90.67	288.00	ALLOWABLE	0.31
4.39	-54.91	288.00	ALLOWABLE	0.19
7.68	-60.86	288.00	ALLOWABLE	0.21
12.11	-73.95	288.00	ALLOWABLE	0.26
11.89	-73.17	288.00	ALLOWABLE	0.25
11.39	-71.43	288.00	ALLOWABLE	0.25
10.63	-68.94	288.00	ALLOWABLE	0.24
10.41	-68.22	288.00	ALLOWABLE	0.24
15.54	-88.23	288.00	ALLOWABLE	0.31
6.73	-58.80	288.00	ALLOWABLE	0.20
12.65	-75.94	288.00	ALLOWABLE	0.26
8.63	-63.14	288.00	ALLOWABLE	0.22

4.9.3 Von Mises Stress

Setelah nilai tegangan *Hoop Stress* dan Tegangan *Longitudinal* didapat, tegangan *von mises* dapat ditentukan. Nilai hasil perhitungan *Von Mises Stress* dan pengecekan hasilnya terhadap ASME B31.8 ditampilkan pada Tabel 4.52 berikut.

Tabel 4.52 Perhitungan Validasi Von Mises Stress pada Pipa yang ditinjau

Panjang <i>span</i>	TEGANGAN			Cek ASME B31.8
	<i>Hoop</i>	Longitudinal	<i>Von Mises</i>	(0.9 x SMYS)
M	MPa	MPa	MPa	
5.38	116.38	-56.36	152.58	ALLOWABLE
2.88	116.38	-53.27	150.27	ALLOWABLE
12.87	116.38	-76.82	168.48	ALLOWABLE
3.61	116.38	-53.97	150.79	ALLOWABLE
19.15	116.38	-106.83	193.37	ALLOWABLE
6.88	116.38	-59.11	154.65	ALLOWABLE
6.98	116.38	-59.31	154.80	ALLOWABLE
7.44	116.38	-60.32	155.57	ALLOWABLE
16.08	116.38	-90.67	179.77	ALLOWABLE
4.39	116.38	-54.91	151.49	ALLOWABLE
7.68	116.38	-60.86	155.98	ALLOWABLE
12.11	116.38	-73.95	166.19	ALLOWABLE
11.89	116.38	-73.17	165.57	ALLOWABLE
11.38	116.38	-71.43	164.19	ALLOWABLE
10.63	116.38	-68.94	162.24	ALLOWABLE
10.41	116.38	-68.22	161.67	ALLOWABLE
15.54	116.38	-88.23	177.75	ALLOWABLE
6.73	116.38	-58.80	154.41	ALLOWABLE
12.65	116.38	-75.94	167.77	ALLOWABLE
8.63	116.38	-63.14	157.73	ALLOWABLE

Dari hasil validasi diatas, nilai tegangan *von mises* pada setiap panjang bentangan bebas yang ada masih memenuhi *Allowable Stress* yang ditetapkan oleh ASME B31.8.

4.10 Pemodelan Bentangan Bebas

Pemodelan ini dilakukan sebagai validasi perhitungan manual tegangan yang telah dibahas sebelumnya. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan ANSYS CFX (*Computational Fluid Dynamic*) dan ANSYS *Static Structural*. Pemodelan CFX dimaksudkan untuk mengetahui pola aliran fluida yang mengenai pipa bawah laut dan *pressure* yang diterima pipa. Sedangkan pemodelan *Static Structural* untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada struktur bentangan bebas. Langkah pengerjaan pemodelan dilakukan dengan memodelkan fluida dengan ANSYS CFX untuk mendapatkan *pressure* arus terhadap pipa, kemudian dimodelkan lagi ke ANSYS *Static Structural* untuk memperoleh nilai pendekatan tegangan maksimum *von mises*.

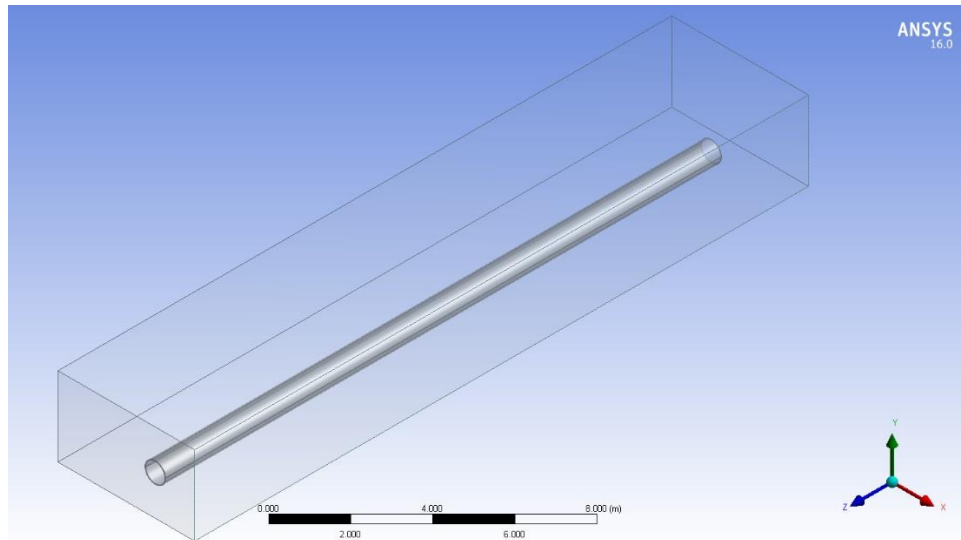
Dalam pembahasan Tugas Akhir ini hanya melakukan pemodelan ANSYS CFX pada bagian struktur pipa bawah laut yang mengalami bentangan bebas dengan kriteria sebagai berikut:

- Bentangan bebas dengan jarak gap tertinggi.
- Memiliki panjang bentang bebas pipa terpanjang.

Kriteria ini dimaksudkan untuk membatasi pemodelan jumlah bentangan bebas yang dibahas dalam subbab ini. Maka dari itu, bentangan bebas yang akan dimodelkan dalam ANSYS CFX yaitu bentangan bebas pipa dengan panjang *span* aktual 19.15 m dan *gap* sebesar 0.5 m. Masing-masing pemodelan dibahas dalam subbab berikutnya.

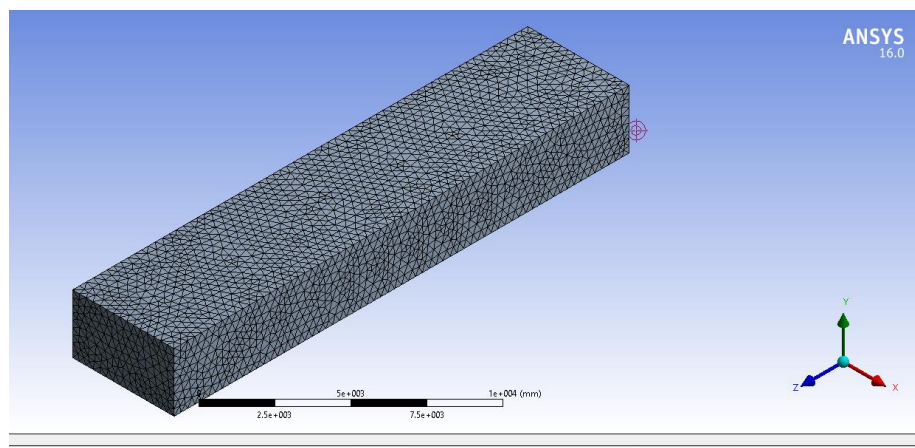
4.10.1 Pemodelan Aliran (ANSYS CFX)

1. Menggambarkan geometri permodelan *free span* yang ditinjau. Permodelan yang sebelumnya telah dilakukan di *software* SOLIDWORK di *convert* ke dalam CFX lalu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah diskritisasi dari elemen dan merupakan bagian terpenting dari ANSYS. Adapun variable geometri yang digunakan adalah diameter terluar *free span* dan panjang dari *free span*. Dalam tugas akhir ini, nilai panjang dari *free span* adalah 19,15 m dengan diameter 0,3556 m dan gap sebesar 0,5 m. Gambar permodelan ditampilkan pada Gambar 4.5 berikut:



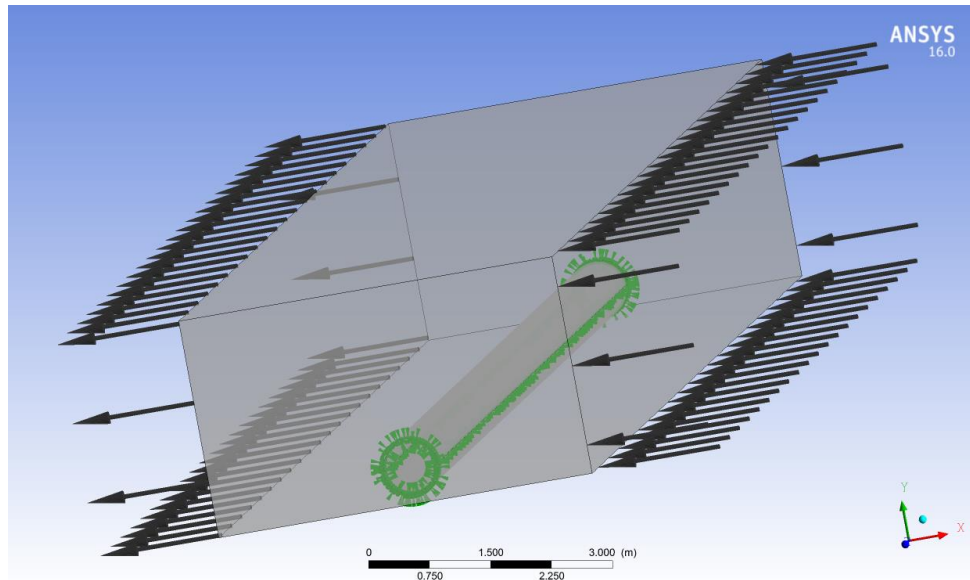
Gambar 4.5 Pemodelan *Pipeline* dengan Panjang 19.15 m

Permodelan di atas merupakan hasil dari SOLIDWORK yang di *convert* ke dalam ANSYS CFX. Untuk balok merupakan domain arus laut, dan model silinder merupakan model dari *free span* yang ditinjau. Setelah pemodelan pipa didapat, kemudian dilakukan *meshing* pada bagian kritis pipa. *Meshing* diasumsikan pada posisi 1/2 panjang *span* yang ditinjau. Gambar 4.6 menampilkan *meshing* pada pipa dan balok sebagai domain arus laut.



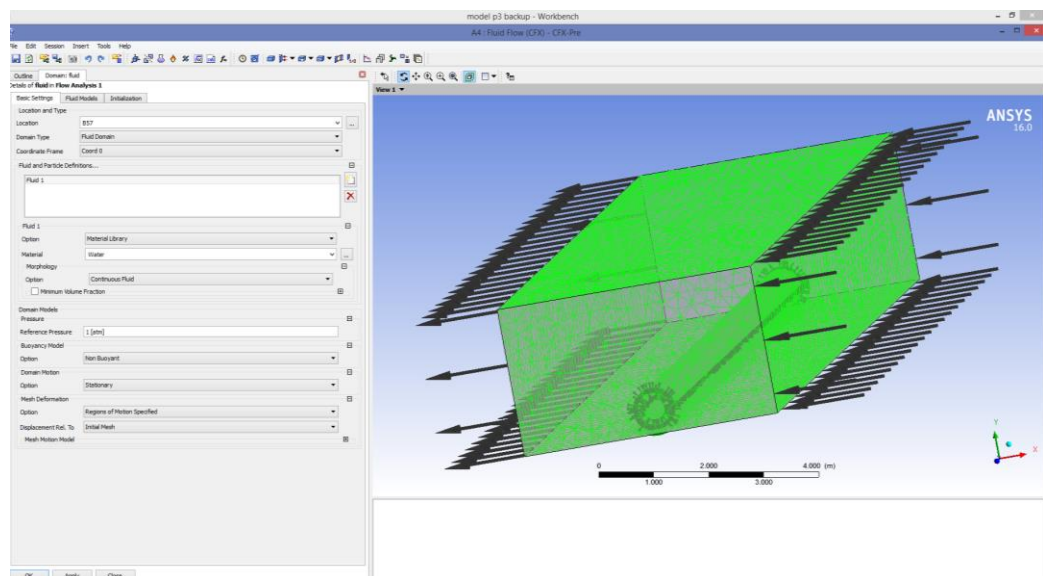
Gambar 4.6 *Meshing* pada dua blok objek

2. Tahapan berikutnya adalah memberikan nama sisi *part* yang dimodelkan. Seperti sisi balok yang digunakan untuk arah awal arus mengalir diberi nama *inlet* dan akhir arus bergerak diberi nama *outlet*. Sisi balok yang lain diberi nama *wall*. Kemudian untuk struktur bentangan bebas diberi nama pipa. Gambar penamaan model ditampilkan pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Penamaan *setup* pada ANSYS CFX

3. Langkah berikutnya adalah pemberian batas – batas analisis pada model geometri. Untuk kondisi batas *inlet* diberikan nilai kecepatan arus sebesar 0.96 m/s (sesuai kondisi arus ekstrem), sedangkan *output* diberi luaran *pressure* 0 MPa. Hal ini dimaksudkan untuk melihat *pressure* yang terjadi di dalam pipa. Sedangkan untuk sisi – sisi domain yang lain, diberikan *boundary condition* berupa *wall*. Setelah itu dipindahkan ke ANSYS Solver Manager agar bisa di *running* sesuai dengan input yang diberikan. Pemberian *Boundary Condition* pada model ditampilkan pada Gambar 4.8

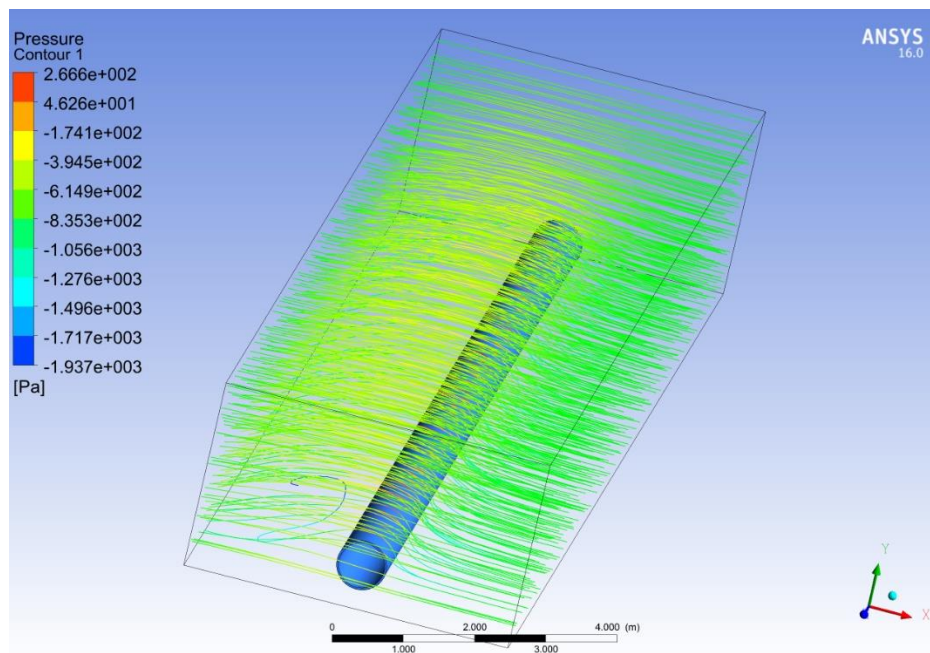


Gambar 4.8 Pemberian *boundary condition* pada model

4.10.2 Hasil Pemodelan (ANSYS CFX)

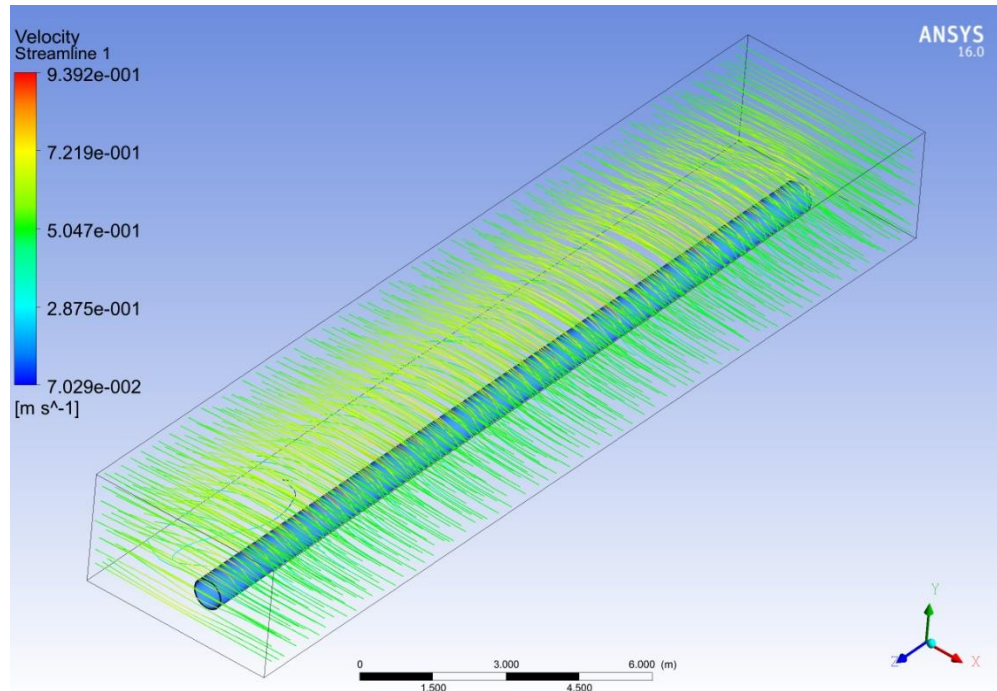
Hasil Permodelan pada ANSYS CFX yang diperoleh memperlihatkan bentuk interaksi antara aliran fluida arus yang terjadi di depan dan belakang pipa seperti ditampilkan pada Gambar 4.9 berikut:

Arah aliran yang menabrak *free span* ini berbentuk *streamline* sesuai bentuk geometri pipa. Tetapi untuk daerah di belakang arus mengalami sedikit *vortex*. Adapun hasil yang *output* dari CFX sebenarnya bermacam – macam, beberapa diantaranya adalah nilai *pressure* akibat dari aliran arus yang menabrak sebesar 266 Pa. Nilai ini nanti diinput kedalam ANSYS *static structural*.



Gambar 4.9 Hasil *Running* Interaksi Fluida dengan Pipa

Untuk nilai dari kecepatan aliran setelah menabrak pipa adalah sebesar 0.94 m/s maksimum dan 0.07 m/s kondisi minimum. Hal ini menandakan terjadi pengurangan kecepatan yang semula 0.96 m/s menjadi 0.94 m/s – 0.07 m/s setelah aliran fluida mengenai pipa. Gambar 4.10 menampilkan hasil pemodelan dengan *output* nilai kecepatan setelah mengenai pipa.



Gambar 4.10 Aliran Kecepatan Fluida setelah Mengenai Pipa

4.10.3 Pemodelan Tegangan *Freespan* (ANSYS Structural)

Permodelan dengan menggunakan ANSYS *static structural* memiliki tujuan untuk mendapatkan tegangan ekuivalen atau tegangan *von mises*. Hasil tegangan yang diperoleh nanti diperlukan untuk validasi terhadap perhitungan tegangan ekuivalen yang sudah dihitung secara manual dan untuk memvisualisasikan tegangan ekuivalen pada pipa yang ditinjau.

1. Permodelan Pipa

Struktur input data untuk pemodelan struktur meliputi Panjang aktual pipa maksimal, diameter luar dari struktur pipa, tebal nominal, massa jenis struktur pipa, modulus Young, koefisien *thermal expansion*, SMYS dan SMTS sesuai dengan data yang telah diketahui pada subbab sebelumnya. Hasil permodelan *pressure* dari ANSYS CFX yang telah dilakukan sebelumnya juga diinput ke dalam permodelan.

2. Input *Force, Moment, Pressure* dan *Support*

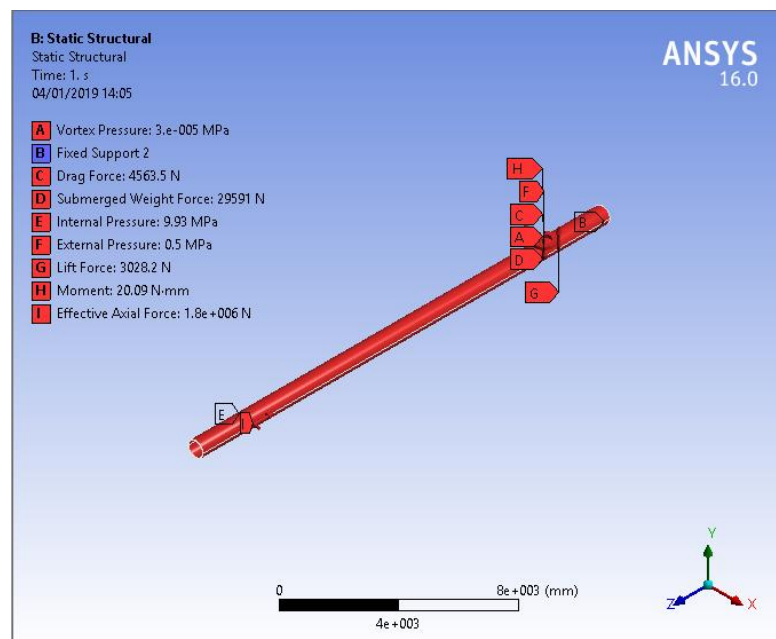
Beban yang diinput merupakan beban – beban yang mempengaruhi besarnya tegangan ekuivalen dan nilainya berasal dari perhitungan

yang telah dilakukan sebelumnya. Berikut beberapa data input pembebanan yang dilakukan pada ANSYS *static structural* ditampilkan pada Tabel 4.53

Tabel 4.53 Input Pembebanan pada Model Pipa

Parameter	Nilai
<i>Vortex Pressure</i>	3×10^{-5} Pa
<i>Support</i>	<i>Fixed-fixed Support</i>
<i>Gaya Drag</i>	4563.5 N
<i>Submerged Weight Force</i>	29591 N
<i>Internal Pressure</i>	9.93 MPa
<i>External Pressure</i>	0.5 MPa
<i>Gaya Lift</i>	3028.2 N
<i>Moment Static</i>	20.09 N.mm
<i>Effective Axial Force</i>	-1.8×10^6 N

Besarnya beban yang diinput beserta arah pembebanannya sesuai dengan beban yang terjadi secara aktual agar hasil analisis yang didapatkan sesuai. *Boundary condition* yang digunakan pada permodelan ini adalah *fixed-fixed*. Arah dan pembebanan yang telah diinput pada ANSYS *static structural* ditampilkan pada Gambar 4.11.

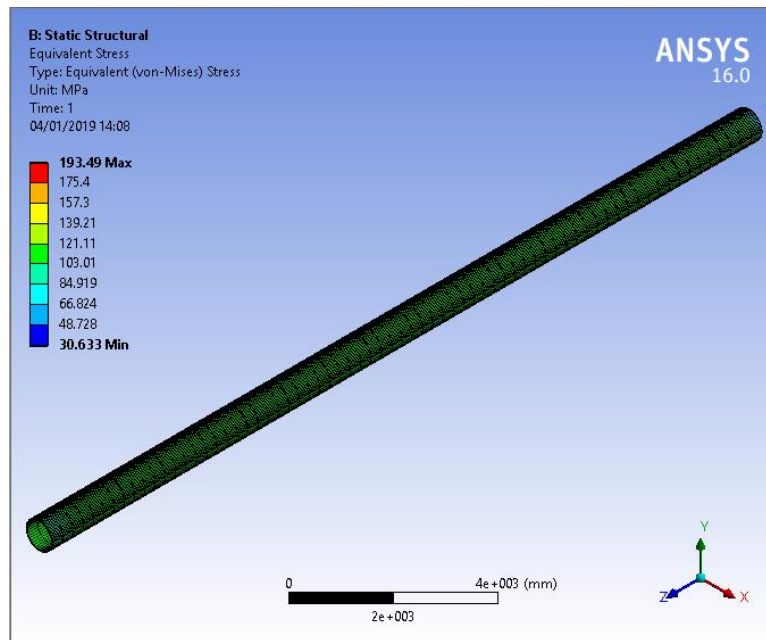


Gambar 4.11 Beban Kombinasi pada Pipa

4.10.4 Hasil Pemodelan Tegangan *Freespan* (ANSYS Structural)

- **Tegangan Ekvivalen (Von Mises Stress)**

Output Solution yang dipilih dalam menentukan *output software* adalah *equivalent stress* (Von Mises stress). Nilai yang ditampilkan berupa nilai range tegangan yang diterima pada struktur pipa, terdapat juga nilai maksimal dan minimal. Gambar *Solution Output* yang dikeluarkan ditampilkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 *Output* Nilai Tegangan Ekvivalen (Von Mises Stress)

Dari *software* didapatkan nilai tegangan *von-mises* maksimal adalah 193.49 MPa. Nilai validasi tegangan ekuivalen perhitungan manual adalah 193.37 MPa, sehingga *error* yang dihasilkan adalah sebesar 0.062%. Hasil tersebut ditampilkan pada Tabel 4.54.

Tabel 4.54 Hasil Validasi Tegangan Perhitungan menurut DNV GL RP F 105 dan Pemodelan

Perhitungan	Nilai	Satuan
Manual (DNV GL RP F 105)	193.37	MPa
Pemodelan (ANSYS Static Structural)	193.49	MPa

4.11 Analisis Umur Kelelahan

Analisis umur kelelahan dalam studi kasus Tugas akhir ini mengacu pada DNV GL RP F 105 dan DNV RP C 203. Perhitungan *fatigue damage* pada tiap tiap bentangan menggunakan komponen *stress range* yang akan menjadi parameter dari nilai siklus pada pipa yang mengalami getaran dinamis VIV. Panjang bentangan yang telah diseleksi dan memenuhi kriteria *fatigue* akan dianalisis berapa umur kelelahannya.

4.11.1 Unit Stress Amplitude

Nilai *Unit Stress Amplitude* berhubungan erat dengan nilai *stress range* untuk tiap tiap arah (*arah in-line* atau *cross-flow*). Berikut parameter yang digunakan untuk perhitungan nilai *Unit Stress Amplitude* ditampilkan pada Tabel 4.55

Tabel 4.55 Parameter Perhitungan *Unit Stress Amplitude*

Parameter	Notasi	Nilai
C4	C_4	14,1
Diameter Total	Dt	0,4692
Diameter Pipa	OD	0,3556
Modulus Young Baja	E	$2,07 \times 10^{11}$
Wall Thickness	t	0,0143
Concrete Stiffness Factor	CSF	0,331
<i>Safety Factor For Fatigue</i>	γ	1,3

Hasil perhitungan *Unit Stress Amplitude* untuk arah *In-Line* dan *Cross-Flow* ditampilkan pada Tabel 4.56.

Tabel 4.56 Perhitungan *Unit Stress Amplitude*

<i>Cross Flow</i>			<i>In-Line</i>		
Panjang <i>Span</i>	Panjang <i>span</i> kritis	Unit stress Amplitude	Panjang <i>Span</i>	Panjang <i>span</i> kritis	Unit stress Amplitude
5,38	9,73	$6,57 \times 10^9$	5,38	9,37	$7,09 \times 10^9$
2,88	12,76	$3,82 \times 10^9$	2,88	12,15	$4,21 \times 10^9$
12,87	5,38	$2,15 \times 10^{10}$	12,87	5,27	$2,24 \times 10^{10}$
3,61	11,71	$4,53 \times 10^9$	3,61	11,21	$4,95 \times 10^9$
19,15	3,62	$4,73 \times 10^{10}$	19,15	3,56	$4,91 \times 10^{10}$
6,88	8,47	$8,66 \times 10^9$	6,88	8,24	$9,15 \times 10^9$
6,98	8,40	$8,82 \times 10^9$	6,98	8,16	$9,34 \times 10^9$

Tabel 4.56 Perhitungan *Unit Stress Amplitude* (lanjutan)

<i>Cross Flow</i>			<i>In-Line</i>		
Panjang <i>Span</i>	Panjang <i>span</i> kritis	Unit stress Amplitude	Panjang <i>Span</i>	Panjang <i>span</i> kritis	Unit stress Amplitude
7,44	8,17	$9,31 \times 10^9$	7,44	7,95	$9,84 \times 10^9$
16,08	4,33	$3,32 \times 10^{10}$	16,08	4,25	$3,45 \times 10^{10}$
4,39	10,75	$5,38 \times 10^9$	4,39	10,32	$5,84 \times 10^9$
7,68	7,87	$1,00 \times 10^{10}$	7,68	7,66	$1,06 \times 10^{10}$
12,11	5,57	$2,00 \times 10^{10}$	12,11	5,46	$2,09 \times 10^{10}$
11,89	5,66	$1,94 \times 10^{10}$	11,89	5,54	$2,03 \times 10^{10}$
11,38	5,96	$1,75 \times 10^{10}$	11,38	5,83	$1,83 \times 10^{10}$
10,63	6,29	$1,57 \times 10^{10}$	10,63	6,15	$1,64 \times 10^{10}$
10,41	6,30	$1,57 \times 10^{10}$	10,41	6,16	$1,64 \times 10^{10}$
15,54	4,54	$3,02 \times 10^{10}$	15,54	4,46	$3,13 \times 10^{10}$
6,73	8,60	$8,41 \times 10^9$	6,73	8,35	$8,93 \times 10^9$
12,65	5,20	$2,30 \times 10^{10}$	12,65	5,10	$2,40 \times 10^{10}$
8,63	6,60	$1,43 \times 10^{10}$	8,63	6,44	$1,50 \times 10^{10}$

Dari perhitungan yang telah dilakukan, semakin besar panjang bentangan kritis yang terjadi maka unit amplitudo tegangan semakin besar dan mempengaruhi nilai *stress range*.

4.11.2 *Stress Range*

Pendekatan perhitungan jumlah siklus tegangan sampai menjadi gagal (N) menggunakan *Palmgreen – Miner Rule*. Metode yang selanjutnya dilakukan adalah mencari nilai rentang tegangan pada struktur bentangan bebas pipa dengan mengacu pada DNV GL RP F105. Tabel 4.57 dan 4.58 menampilkan perhitungan untuk mencari *stress range* pada tiap bentangan pipa dalam kondisi *inline* dan *cross-flow*.

Tabel 4.57 Perhitungan *stress range* kondisi *In-line*

<i>In-Line</i>							
Panjang <i>span</i>	Panjang <i>span</i> kritis	<i>Unit stress amplitude</i>	A_y/D	Current Flow ratio	Ψ	Stress Range	Stress Range (Mpa)
5,38	9,37	$7,09 \times 10^9$	0.0019	0,998	1	3.46E+07	34.55
2,88	12,15	$4,21 \times 10^9$	0.0019	0,998	1	2.05E+07	20.53

Tabel 4.57 Perhitungan *stress range* kondisi *In-line* (lanjutan)

In-Line							
Panjang span	Panjang span kritis	Unit stress amplitude	Ay/D	Current Flow ratio	Ψ	Stress Range	Stress Range (Mpa)
12,87	5,27	$2,24 \times 10^{10}$	0.0016	0,998	1	9.42E+07	94.23
3,61	11,21	$4,95 \times 10^9$	0.0019	0,998	1	2.41E+07	24.15
19,15	3,56	$4,91 \times 10^{10}$	0.0015	0,998	1	1.91E+08	191.49
6,88	8,24	$9,15 \times 10^9$	0.0019	0,998	1	4.46E+07	44.62
6,98	8,16	$9,34 \times 10^9$	0.0019	0,998	1	4.56E+07	45.56
7,44	7,95	$9,84 \times 10^9$	0.0016	0,998	1	4.14E+07	41.40
16,08	4,25	$3,45 \times 10^{10}$	0.0019	0,998	1	1.68E+08	168.02
4,39	10,32	$5,84 \times 10^9$	0.0019	0,998	1	2.85E+07	28.49
7,68	7,66	$1,06 \times 10^{10}$	0.0019	0,998	1	5.17E+07	51.66
12,11	5,46	$2,09 \times 10^{10}$	0.0019	0,994	1	1.02E+08	101.76
11,89	5,54	$2,03 \times 10^{10}$	0.0019	0,998	1	9.88E+07	98.80
11,38	5,83	$1,83 \times 10^{10}$	0.0016	0,998	1	7.70E+07	76.99
10,63	6,15	$1,64 \times 10^{10}$	0.0016	0,998	1	6.91E+07	69.09
10,41	6,16	$1,64 \times 10^{10}$	0.0019	0,998	1	7.99E+07	79.94
15,54	4,46	$3,13 \times 10^{10}$	0.0023	0,998	1	1.86E+08	186.10
6,73	8,35	$8,93 \times 10^9$	0.0019	0,998	1	4.35E+07	43.53
12,65	5,10	$2,40 \times 10^{10}$	0.0019	0,998	1	1.20E+08	119.74
8,63	6,44	$1,50 \times 10^{10}$	0.0013	0,998	1	5.23E+07	52.31

Tabel 4.58 Perhitungan *stress range* kondisi *Cross flow*

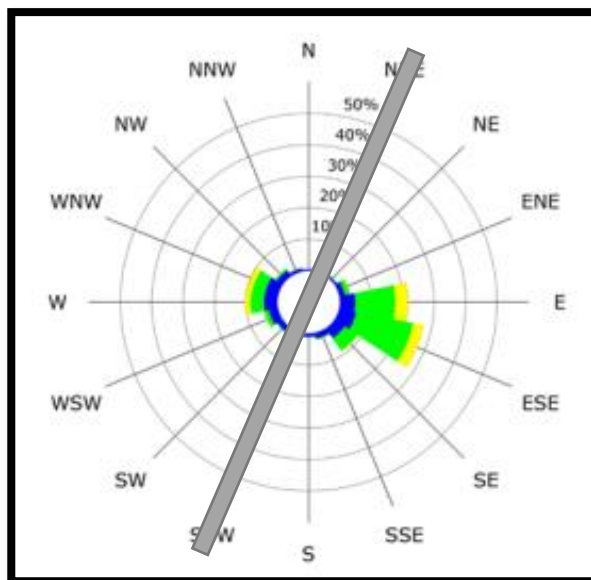
Cross Flow							
Panjang span	Panjang span kritis	Unit stress amplitude	Az/D	Ksd	Rk	Stress Range	Stress Range (Mpa)
5,38	9,73	$6,57 \times 10^9$	0.0010	0,728	0,891	1.52E+07	15.21
2,88	12,76	$3,82 \times 10^9$	0.0010	0,728	0,891	8.85E+06	8.85
12,87	5,38	$2,15 \times 10^{10}$	0.0010	0,713	0,893	4.99E+07	49.94
3,61	11,71	$4,53 \times 10^9$	0.0010	0,728	0,891	1.05E+07	10.50
19,15	3,62	$4,73 \times 10^{10}$	0.0010	0,728	0,891	1.10E+08	109.64
6,88	8,47	$8,66 \times 10^9$	0.0010	0,728	0,891	2.01E+07	20.06
6,98	8,40	$8,82 \times 10^9$	0.0010	0,728	0,891	2.04E+07	20.43
7,44	8,17	$9,31 \times 10^9$	0.0010	0,713	0,893	2.16E+07	21.62
16,08	4,33	$3,32 \times 10^{10}$	0.0010	0,728	0,891	7.69E+07	76.91
4,39	10,75	$5,38 \times 10^9$	0.0010	0,728	0,891	1.25E+07	12.47
7,68	7,87	$1,00 \times 10^{10}$	0.0010	0,728	0,891	2.33E+07	23.25
12,11	5,57	$2,00 \times 10^{10}$	0.0010	0,728	0,891	4.64E+07	46.37

Tabel 4.58 Perhitungan *stress range* kondisi *Cross flow*

Cross Flow							
Panjang span	Panjang span kritis	Unit stress amplitude	Az/D	Ksd	Rk	Stress Range	Stress Range (Mpa)
11,89	5,66	$1,94 \times 10^{10}$	0.0010	0,728	0,891	4.50E+07	45.01
11,38	5,96	$1,75 \times 10^{10}$	0.0010	0,713	0,893	4.07E+07	40.70
10,63	6,29	$1,57 \times 10^{10}$	0.0010	0,713	0,893	3.65E+07	36.47
10,41	6,30	$1,57 \times 10^{10}$	0.0010	0,728	0,891	3.63E+07	36.30
15,54	4,54	$3,02 \times 10^{10}$	0.0010	0,713	0,893	7.01E+07	70.07
6,73	8,60	$8,41 \times 10^9$	0.0010	0,728	0,891	1.95E+07	19.48
12,65	5,20	$2,30 \times 10^{10}$	0.0010	0,760	0,886	5.30E+07	52.97
8,63	6,60	$1,43 \times 10^{10}$	0.0010	0,825	0,876	3.25E+07	32.49

4.11.3 Analisis Siklus Tegangan (n)

Langkah pertama adalah menghitung jumlah siklus selama masa operasi *pipeline* dengan menggunakan frekuensi *vortex shedding* yang menyebabkan pipa mengalami VIV. Kemudian dari hasil tersebut dikalikan dengan jumlah kejadian berdasarkan data arus di daerah *West Madura*. Data jumlah kejadian arus pada studi kasus Tugas Akhir ini menggunakan data lingkungan PHE WMO tahun 1992 sampai 2010. Tabel 4.59 menampilkan data kejadian arus di Madura (Blok I) *Central Processing Platform – Onshore Receiving Facility*. Pada Gambar 4.13 mengilustrasikan arah arus yang mengenai pipa.



Gambar 4.13 Ilustrasi Arah Arus yang Mengenai Pipa

Tabel 4.59 Data *Occurrence* Arus PHE WMO 1992-2010

Near-bottom All-months Current Occurrence at Cluster I (1992-2010)

Direction	Number of Hours						Percentage					
Cur. Speed (cm/s)	< 25	25-50	50-75	75-100	> 100	Total	< 25	25-50	50-75	75-100	> 100	Total
North	967	0	0	0	0	967	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61
North North East	916	0	0	0	0	916	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58
North East	1210	0	0	0	0	1210	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77
East North East	2621	0	0	0	0	2621	1.66	0.00	0.00	0.00	0.00	1.66
East	15392	1242	15	0	0	16649	9.77	0.79	0.01	0.00	0.00	10.56
East South East	26889	2966	5	0	0	29860	17.06	1.88	0.00	0.00	0.00	18.95
South East	5775	2	0	0	0	5777	3.66	0.00	0.00	0.00	0.00	3.67
South South East	2946	0	0	0	0	2946	1.87	0.00	0.00	0.00	0.00	1.87
South	2277	0	0	0	0	2277	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	1.44
South South West	2331	0	0	0	0	2331	1.48	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48
South West	3627	0	0	0	0	3627	2.30	0.00	0.00	0.00	0.00	2.30
West South West	7748	0	0	0	0	7748	4.92	0.00	0.00	0.00	0.00	4.92
West	41096	614	0	0	0	41710	26.07	0.39	0.00	0.00	0.00	26.46
West North West	32903	1090	0	0	0	33993	20.88	0.69	0.00	0.00	0.00	21.57
North West	3580	0	0	0	0	3580	2.27	0.00	0.00	0.00	0.00	2.27
North North West	1395	0	0	0	0	1395	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89
Total	= 157607						= 100.00					

Setelah didapatkan jumlah keseluruhan siklus yang terjadi pada pipa, hasil tersebut akan digunakan untuk perkalian dengan frekuensi *vortex shedding* untuk mengetahui komponen peluang siklus kejadian VIV. Tabel 4.60 dan 4.61 menampilkan perhitungan frekuensi *vortex shedding* sebagai komponen siklus VIV yang mengenai pipa.

Tabel 4.60 Perhitungan Siklus arus pada Pipa (n) (*In-line*)

Panjang Span	Tegangan	Strouhal Number	Frekuensi Vortex Shedding	Jumlah Siklus (n_i)
	MPa		10 Tahun	10 Tahun
5.38	18.43	0.202	0.204	1.43×10^4
2.88	10.95	0.202	0.204	1.43×10^4
12.87	58.23	0.205	0.213	1.49×10^4
3.61	12.88	0.202	0.204	1.43×10^4
19.15	127.66	0.199	0.202	1.42×10^4
6.88	23.80	0.202	0.204	1.43×10^4
6.98	24.30	0.202	0.204	1.43×10^4
7.44	25.58	0.205	0.213	1.49×10^4
16.08	89.61	0.202	0.204	1.43×10^4
4.39	15.20	0.202	0.204	1.43×10^4
7.68	27.55	0.202	0.204	1.43×10^4

Tabel 4.60 Perhitungan dan Siklus arus pada Pipa (*In-line*) (n) (Lanjutan)

Panjang Span	Tegangan	Strouhal Number	Frekuensi Vortex Shedding	Jumlah Siklus (n_i)
	MPa		10 Tahun	10 Tahun
12.11	54.27	0.202	0.205	1.44×10^4
11.89	52.70	0.202	0.204	1.43×10^4
11.38	47.58	0.205	0.213	1.49×10^4
10.63	42.70	0.205	0.213	1.49×10^4
10.41	42.63	0.202	0.204	1.43×10^4
15.54	81.47	0.205	0.217	1.53×10^4
6.73	23.22	0.202	0.204	1.43×10^4
12.65	62.27	0.196	0.194	1.36×10^4
8.63	39.00	0.185	0.179	1.26×10^4

Tabel 4.61 Perhitungan Siklus arus Pipa (n) (*Cross-flow*)

Panjang Span	Tegangan	Strouhal Number	Frekuensi Vortex Shedding	Jumlah Siklus (n_i)
	MPa		10 Tahun	10 Tahun
5.38	28.51	0.1921	0.397	2.79×10^4
2.88	16.59	0.1921	0.397	2.79×10^4
12.87	80.81	0.1948	0.413	2.90×10^4
3.61	19.69	0.1921	0.397	2.79×10^4
19.15	164.46	0.1900	0.392	2.75×10^4
6.88	37.62	0.1921	0.397	2.79×10^4
6.98	38.31	0.1921	0.397	2.79×10^4
7.44	34.98	0.1948	0.413	2.79×10^4
16.08	144.20	0.1921	0.397	2.79×10^4
4.39	23.38	0.1921	0.397	2.90×10^4
7.68	43.59	0.1921	0.397	2.79×10^4
12.11	86.94	0.1921	0.397	2.75×10^4
11.89	84.39	0.1921	0.397	2.79×10^4
11.38	65.86	0.1948	0.413	2.79×10^4
10.63	59.01	0.1948	0.413	2.90×10^4
10.41	68.06	0.1921	0.397	2.79×10^4

Tabel 4.61 Perhitungan Siklus arus Pipa (*Cross-flow*) (n) (Lanjutan)

Panjang Span	Tegangan	Strouhal Number	Frekuensi Vortex Shedding	Jumlah Siklus (n_i)
	MPa		10 Tahun	10 Tahun
15.54	160.06	0.1948	0.421	2.95×10^4
6.73	36.53	0.1921	0.397	2.79×10^4
12.65	101.84	0.1867	0.379	2.66×10^4
8.63	43.58	0.1765	0.351	2.46×10^4

Langkah selanjutnya adalah menentukan kategori kurva SN pada kode DNV RP – C 203 yang mendekati kriteria struktur. Penentuan kategori kurva SN struktur yang digunakan dalam analisis *fatigue* dan disesuaikan dalam Tabel 4.62 kode DNV RP – C 203. Dalam table tersebut mengklasifikasikan detail struktur *tubular*, karena struktur pada Tugas Akhir ini adalah pipa.

Kemudian menentukan jumlah nilai siklus tegangan struktur dan nilai siklus tegangan menuju kegagalan pada *stress range*. Pada perkiraan jumlah siklus tegangan pada struktur biasanya terjadi sekitar 2% - 10% dari nilai siklus terjadi. Pemilihan jenis kurva S-N sudah didapatkan pada paragraph sebelumnya yaitu kurva SN kategori D.

Tabel 4.62 Parameter Siklus Tegangan

Parameter	Notasi	Nilai
Eksponen S-N Curve	m	3
S-N Curve Jenis Pipa	-	D
Log A	-	11,764

Perkiraan jumlah siklus tegangan menuju kegagalan atau (N) tiap segmen bentangan bebas pipa dapat ditentukan dengan Persamaan 2.61. Tabel 4.63 dan 4.64 menampilkan perhitungan jumlah siklus kegagalan pada tegangan pipa

Tabel 4.63 Perhitungan Jumlah Siklus Kegagalan Tegangan Pipa (*In-line*) (N)

Panjang Span	Tegangan	Jumlah Siklus (n _i)	A	m	Siklus Kegagalan Tegangan (N _i)
	Mpa	10 Tahun	Log A		
5.38	34.55	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	1.23×10^6
2.88	20.53	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.86×10^6
12.87	94.23	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	6.07×10^4
3.61	24.15	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	3.61×10^6
19.15	191.49	1.42×10^4	5.07×10^{10}	3	7.23×10^3
6.88	44.62	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.71×10^5
6.98	45.56	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.37×10^5
7.44	41.40	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	7.15×10^5
16.08	168.02	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	1.07×10^4
4.39	28.49	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	2.19×10^6
7.68	51.66	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	3.68×10^5
12.11	101.76	1.44×10^4	5.07×10^{10}	3	4.82×10^4
11.89	98.80	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.26×10^4
11.38	76.99	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	1.11×10^5
10.63	69.09	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	1.54×10^5
10.41	79.94	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	9.94×10^4
15.54	186.10	1.53×10^4	5.07×10^{10}	3	7.88×10^3
6.73	43.53	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	6.15×10^5
12.65	119.74	1.36×10^4	5.07×10^{10}	3	2.96×10^4
8.63	52.31	1.26×10^4	5.07×10^{10}	3	3.55×10^5

Tabel 4.64 Perhitungan Jumlah Siklus Kegagalan pada Tegangan Pipa (*Cross flow*)

Panjang Span	Tegangan	Jumlah Siklus (n _i)	A	m	Siklus Kegagalan Tegangan (N _i)
	Mpa	10 Tahun	Log A		
16.08	15.21	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	1.44×10^7
4.39	8.85	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	7.33×10^7
7.68	49.94	2.90×10^4	5.07×10^{10}	3	4.08×10^5
12.11	10.50	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	4.38×10^7
11.89	109.64	2.75×10^4	5.07×10^{10}	3	3.85×10^4
11.38	20.06	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	6.29×10^6
10.63	20.43	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	5.95×10^6

Tabel 4.64 Perhitungan Jumlah Siklus Kegagalan Tegangan Pipa (*Cross flow*)
(N) (Lanjutan)

Panjang Span	Tegangan	Jumlah Siklus (n_i)	A	m	Siklus Kegagalan Tegangan (N_i)
	Mpa	10 Tahun	Log A		
16.08	76.91	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	1.12×10^5
4.39	12.47	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	2.62×10^7
7.68	23.25	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	4.04×10^6
12.11	46.37	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	5.09×10^5
11.89	45.01	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	5.57×10^5
11.38	40.70	2.90×10^4	5.07×10^{10}	3	7.53×10^5
10.63	36.47	2.90×10^4	5.07×10^{10}	3	1.05×10^6
10.41	36.30	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	1.06×10^6
15.54	70.07	2.95×10^4	5.07×10^{10}	3	1.48×10^5
6.73	19.48	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	6.87×10^6
12.65	52.97	2.66×10^4	5.07×10^{10}	3	3.42×10^5
8.63	32.49	2.46×10^4	5.07×10^{10}	3	1.48×10^6

4.11.4 Akumulasi *Fatigue Damage*

Langkah berikutnya adalah menghitung *fatigue damage* menurut DNV GL RP F 105. Didalam DNV RP C 203 *fatigue damage* diperoleh dari pembagian antara nilai jumlah siklus yang terjadi dengan jumlah siklus kegagalan tegangan pada pipa. Kemudian *fatigue damage* dikalikan dengan faktor keamanan dan batas ijin kerusakan (*allowable damage ratio*) pada DNV GL RP F 105. Hasil perhitungan *fatigue damage* ditampilkan pada Tabel 4.65 dan 4.66.

Tabel 4.65 Perhitungan *Fatigue Damage* Kondisi *In-Line*

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Damage</i>
	DNV RP C 203	DNV GL RP F 105	DNV OS F101
5.38	0.012	0.029	0.016
2.88	0.002	0.006	0.003
12.87	0.246	0.616	0.349
3.61	0.004	0.010	0.006
19.15	1.958	4.896	2.774
6.88	0.025	0.063	0.036
6.98	0.027	0.067	0.038
7.44	0.021	0.052	0.030
16.08	1.338	3.345	1.895
4.39	0.007	0.016	0.009
7.68	0.039	0.097	0.055
12.11	0.299	0.748	0.424
11.89	0.272	0.680	0.385
11.38	0.134	0.336	0.190
10.63	0.097	0.243	0.138
10.41	0.144	0.360	0.204
15.54	1.938	4.844	2.745
6.73	0.023	0.058	0.033
12.65	0.462	1.154	0.654
8.63	0.036	0.089	0.050

Tabel 4.66 Perhitungan *Fatigue Damage* Kondisi *Cross-flow*

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Damage</i>
	DNV RP C 203	DNV GL RP F 105	DNV OS F101
5.38	0.0019	0.005	0.0027
2.88	0.0004	0.001	0.0005
12.87	0.0711	0.178	0.1007
3.61	0.0006	0.002	0.0009
19.15	0.7151	1.788	1.0131
6.88	0.0044	0.011	0.0063
6.98	0.0047	0.012	0.0066
7.44	0.0058	0.014	0.0082

Tabel 4.66 Perhitungan *Fatigue Damage* Kondisi *Cross-flow* (Lanjutan)

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Damage</i>
	DNV RP C 203	DNV GL RP F 105	DNV OS F101
16.08	0.2496	0.624	0.3536
4.39	0.0011	0.003	0.0015
7.68	0.0069	0.017	0.0098
12.11	0.0547	0.137	0.0775
11.89	0.0500	0.125	0.0709
11.38	0.0385	0.096	0.0545
10.63	0.0277	0.069	0.0392
10.41	0.0262	0.066	0.0372
15.54	0.2001	0.500	0.2835
6.73	0.0041	0.010	0.0057
12.65	0.0779	0.195	0.1103
8.63	0.0166	0.042	0.0236

4.11.5 *Fatigue Life*

Langkah terakhir dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah menghitung umur kelelahan pada tiap-tiap panjang bentangan dalam kondisi *In-line* dan *cross flow*. Hasil perhitungan umur kelelahan ditampilkan pada Tabel 4.67 dan 4.68

Tabel 4.67 Perhitungan *Fatigue Life* Kondisi *In-Line*

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Cek Kegagalan</i>
	DNV GL RP F 105	Tahun	DNV OS F101	Tahun	
5.38	0.029	171.9	0.0165	1213.54	TIDAK GAGAL
2.88	0.006	819.2	0.0035	5782.35	TIDAK GAGAL
12.87	0.616	8.1	0.3489	57.32	TIDAK GAGAL
3.61	0.010	503.6	0.0056	3554.55	TIDAK GAGAL
19.15	4.896	1.0	2.7744	7.21	GAGAL
6.88	0.063	79.8	0.0355	563.27	TIDAK GAGAL
6.98	0.067	75.0	0.0378	529.42	TIDAK GAGAL

Tabel 4.67 Perhitungan *Fatigue Life* Kondisi *In-Line* (Lanjutan)

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Cek Kegagalan</i>
	DNV GL RP F 105	Tahun	DNV OS F101	Tahun	
7.44	0.052	95.8	0.0296	675.92	TIDAK GAGAL
16.08	3.345	1.5	1.8955	10.55	GAGAL
4.39	0.016	306.6	0.0092	2163.88	TIDAK GAGAL
7.68	0.097	51.4	0.0551	362.99	TIDAK GAGAL
12.11	0.748	6.7	0.4237	47.20	TIDAK GAGAL
11.89	0.680	7.4	0.3854	51.89	TIDAK GAGAL
11.38	0.336	14.9	0.1903	105.09	TIDAK GAGAL
10.63	0.243	20.6	0.1375	145.41	TIDAK GAGAL
10.41	0.360	13.9	0.2041	97.99	TIDAK GAGAL
15.54	4.844	1.0	2.7450	7.29	GAGAL
6.73	0.058	85.9	0.0330	606.65	TIDAK GAGAL
12.65	1.154	4.3	0.6539	30.59	TIDAK GAGAL
8.63	0.089	56.3	0.0503	397.68	TIDAK GAGAL

Tabel 4.68 Perhitungan *Fatigue Life* Kondisi *Cross-flow*

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Cek Kegagalan</i>
	DNV GL RP F 105	Tahun	DNV OS F101	Tahun	
5.38	0.005	1036.7	0.0027	7317.91	TIDAK GAGAL
2.88	0.001	5266.0	0.0005	37171.42	TIDAK GAGAL
12.87	0.178	28.1	0.1007	198.65	TIDAK GAGAL
3.61	0.002	3148.0	0.0009	22220.89	TIDAK GAGAL
19.15	1.788	2.8	1.0131	19.74	GAGAL
6.88	0.011	451.3	0.0063	3185.78	TIDAK GAGAL
6.98	0.012	427.5	0.0066	3017.53	TIDAK GAGAL
7.44	0.014	346.9	0.0082	2448.50	TIDAK GAGAL
16.08	0.624	8.0	0.3536	56.56	TIDAK GAGAL
4.39	0.003	1879.4	0.0015	13266.37	TIDAK GAGAL
7.68	0.017	290.0	0.0098	2047.09	TIDAK GAGAL
12.11	0.137	36.6	0.0775	258.06	TIDAK GAGAL
11.89	0.125	40.0	0.0709	282.23	TIDAK GAGAL
11.38	0.096	52.0	0.0545	366.92	TIDAK GAGAL
10.63	0.069	72.3	0.0392	510.16	TIDAK GAGAL

Tabel 4.68 Perhitungan *Fatigue Damage* Kondisi *Cross-flow* (Lanjutan)

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Cek Kegagalan</i>
	DNV GL RP F 105	Tahun	DNV OS F101	Tahun	
10.41	0.066	76.2	0.0372	537.89	TIDAK GAGAL
15.54	0.500	10.0	0.2835	70.56	TIDAK GAGAL
6.73	0.010	493.1	0.0057	3480.41	TIDAK GAGAL
12.65	0.195	25.7	0.1103	181.26	TIDAK GAGAL
8.63	0.042	120.2	0.0236	848.39	TIDAK GAGAL

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari proses analisis yang telah dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Bentangan bebas pipa pada studi kasus yang telah dianalisis menurut DNV GL RP F105 adalah sebanyak 3 bentangan dengan masing masing panjang bentangan 19.15 m, 16.1 m, dan 15.5 m mengalami kelelahan karena melebihi batas ijin *span* yang telah ditentukan serta umur kelelahan dibawah umur operasi pipa
2. Nilai tegangan ekuivalen (*Von Mises*) yang diperoleh pada setiap *span* yang ditinjau hasil *screening criteria fatigue* berada pada rentang 150,27 MPa – 193.37 MPa. Untuk nilai tegangan ekuivalen terbesar, terjadi pada *span* dengan panjang aktual 19 m dan *gap* 0.5 m sebesar 193,37 MPa dengan rasio 0,6 terhadap tegangan ijin yang ditentukan oleh ASME B3.18. Dan nilai tegangan ekuivalen terkecil terjadi pada *span* dengan panjang aktual 2.88 m dan *gap* 0,3 sebesar 150,27 MPa dengan rasio 0,46 terhadap *Allowable stress* ASME B3.18.
3. Berdasarkan analisis umur kelelahan yang telah dilakukan, terdapat 3 bentangan yang mengalami kegagalan arah *in-line* dan 1 bentangan mengalami kegagalan arah *cros-flow*. Umur kelelahan pipa secara *in-line* yaitu dengan panjang bentangan 19.15 m, 16.08 m, 15.54 m dengan masing-masing umur kelelahan 7.21 tahun, 7.29 tahun, dan 10.55 tahun. Umur Kelelahan kondisi *cross-flow* yaitu dengan panjang bentangan 19.15 m dengan umur kelelahan 19.74 tahun

5.2 Saran

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa kekurangan di dalamnya, sehingga dapat menjadi penelitian lanjutan ke depannya. Adapun saran yang dapat diberikan sebagai masukan dalam penelitian lanjutan ke depannya antara lain:

1. Analisis bentangan bebas dapat dilakukan dengan asumsi jenis *multispan* dengan mempertimbangkan *response multi-mode* dengan menggunakan software ABAQUS untuk melihat respon gerakan pipa yang dihasilkan.
2. Perlu dilakukan analisis level 3 *freespan* yang diakibatkan karena VIV dengan menghitung umur kelelahan pipa sampai mengalami resonansi akibat VIV
3. Mempertimbangkan kondisi *support* sesuai dengan studi kasus, supaya perhitungan untuk *response model* yang dilakukan untuk mode *multi-span* bisa diaplikasikan.
4. Melakukan koreksi untuk panjang bentangan bebas yang mengalami kegagalan statis agar panjang *span* bisa diretifikasi oleh perusahaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Anang. 2016. **Analisa *Suppression Device* Sebagai Peredam *Vortex Induced Vibration (VIV)* Pada *Free Span* Menggunakan Metode Elemen Hingga**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Sistem Perkapalan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Adhitya P, F. 2018. **Analisis Umur Kelelahan Akibat *Free Span* yang Terjadi pada *Export Pipeline* saat Kondisi Operasi**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Albert, Alexander. P. 2011. **Pipeline to Market**. Houston, Texas, USA.
- Alkazraji, Duraid. 2008. **A Quick Guide Pipeline Engineering**. Woodhead Publishing Limited: England.
- ASME B31.8: **Gas Transmission and Distribution Piping System**. American Steel Mechanical Engineering, USA
- Bai, Yong. 2001. **Pipelines and Risers**. Elsevier. USA
- Bai, Yong dan Qiang Bai. 2005. **Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation**. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing Elsevier
- Basir, I.A.M. 2015. **Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh *Vortex Induced Vibration* yang Terjadi pada Lokasi Crossing Pipelines “Studi Kasus : Kilo Field Milik Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java”**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Blevins. 1990. **Flow Induced Vibrations**. Florida: Krieger Publishing Co.
- Braestrup, M.W. 2005. **Design and Installation of Marine Pipeline**. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd.
- Craig, R. Randy Clark, S.K. John Willey. 1981. **Structural Dynamics. An Introduction to Computers Method**. New York: Taylor and Francis

- DNV GL RP F105. 2017. **Free Spanning Pipeline**. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- DNV RP C203. 2005. **Fatigue Design of Offshore Steel Structures**. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- DNV OS F101. 2013. **Submarine Pipeline System**. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- Guo, Boyun, S. Song, Chako. J, dan Ali Ghalambor. 2005. **Offshore Pipeline**. New York: Elsevier.
- K. Rezazadeh, L. Zhu, Y. Bai, L. Zhang, **Fatigue Analysis of Multi-Spanning Subsea Pipeline**: Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering
- Kenny, J. P. dkk. 1993. **Structural Analysis of Pipeline Spans**. Sheffield: Health and Safety Executive-Offshore Technology Information.
- Mouselli, A. H. 1981. **Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods**. Oklahoma: PennWell Books.
- Q. Bai, Y. Bai. 2014. **Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation**. Boston: Gulf Professional Publishing
- Pertamina Hulu Energi. 2013. **Pipeline Free Span Analysis “Feed For PHE-7, PHE-12, And PHE -24 Platform Development”**. Jakarta
- Sibuea, C., Mulyadi, Y. and Rochani, I., 2017. Analisis On-Bottom Stability dan Local Buckling: Studi Kasus Pipa Bawah Laut dari Platform Ula Menuju Platform Uw. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2).
- Soegiono. 2007. **Pipa Bawah Laut**. Surabaya: Airlangga University Press
- Summer, J. Fredsøe. 2006. **Hydrodynamics around Cylindrical Structures Adv. Series on Ocean Eng.**, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd: Singapore.

Syahroni, N. and Berge, S., 2012. **Fatigue Assessment of Welded Joints Taking Into Account Effects Of Residual Stress**. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 134(2), p.021405

Tura, F., Bryndum, M.B. and Nielsen, N.J.R., 1994. “**Guideline for Free Spanning Pipelines: Outstanding Items and Technological Innovations**”. *Proceeding of Conference on Advances in Subsea Pipeline Engineering and Technology*. Aberdeen.

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN DIMENSI, MASSA EFEKTIF

DAN BERAT PIPA TERENDAM

LAMPIRAN A

A.1 Perhitungan Dimensi Pipa

1. Diameter Dalam Pipa (D_i)

$$\begin{aligned} D_i &= D_0 - 2(t_{nom} + t_{int}) \\ &= 0,3556 - 2(0,0143) &= 0,327 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Diameter Total Pipa (D_t)

$$\begin{aligned} D_t &= D_0 + 2t_{cc} + 2t_{conc} + 2t_{mg} \\ &= 0,3556 + 2(0,051) + 2(0,006) &= 0,469 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Diameter Lapisan Anti Korosi (D_{cc})

$$\begin{aligned} D_{cc} &= D_0 + 2.t_{cc} \\ &= 0,3556 + 2(0,006) &= 0,366 \text{ m} \end{aligned}$$

4. Diameter Lapisan *Concrete* (D_{conc})

$$\begin{aligned} D_{conc} &= D_0 + 2(t_{cc} + t_{conc}) \\ &= 0,3556 + 2(0,006 + 0,05) &= 0,469 \text{ m} \end{aligned}$$

5. Luas Internal Pipa (A_i)

$$\begin{aligned} A_i &= \pi \frac{(D_i^2)}{4} \\ &= 3,14 \times 0,327^2 / 4 &= 0,084 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

6. Luas Pipa Lapisan Baja (A_{st})

$$\begin{aligned} A_{st} &= \pi \frac{(D_0^2 - D_i^2)}{4} \\ &= (3,14/4) \times (0,3556^2 - 0,327^2) &= 0,015 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

7. Luas Pipa Lapisan Anti Korosi (A_{cc})

$$\begin{aligned} A_{cc} &= \pi \frac{(D_{cc}^2)}{4} - A_{st} - A_i \\ &= (3,14/4 \times 0,366^2) - 0,015 - 0,084 &= 0,007 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

8. Luas Pipa Lapisan *Concrete* (A_{conc})

$$\begin{aligned} A_{conc} &= \pi \frac{(D_{conc}^2)}{4} - A_{st} - A_i - A_{cc} \\ &= (3,14/4 \times 0,469^2) - 0,015 - 0,084 - 0,007 &= 0,067 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

A.2 Perhitungan Massa Efektif dan Berat Pipa Terendam

1. Perhitungan Massa Pipa di Udara

- a. Massa Struktur Pipa Baja (Mst)

$$\begin{aligned} m_{st} &= A_{st} \times \rho_{st} \\ &= 0,015 \times 7850 &= 120,36 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

- b. Massa Lapisan Pipa Anti Korosi (Mcc)

$$\begin{aligned} m_{cc} &= \pi \frac{(D_{cc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{cc} \\ &= 0,007 \times 1300 &= 8,72 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

- c. Massa Lapisan Concrete (Mcc)

$$\begin{aligned} m_{conc} &= \pi \frac{(D_{wc}^2 - D_0^2)}{4} \rho_{conc} \\ &= 0,067 \times 3043 &= 203,19 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

- d. Massa Konten Pipa (Mfluida)

$$\begin{aligned} m_{fluida} &= A_i \times \rho_{fluida} \\ &= 0,084 \times 60 &= 2,461 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

2. Perhitungan Berat Terendam Pipa

- a. Massa Struktur Pipa (Mstr)

$$\begin{aligned} m_{str} &= m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \\ &= 120,36 + 8,72 + 203,19 &= 332,28 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

- b. Massa Displacement (Mdisp)

$$\begin{aligned} m_{disp} &= \frac{\pi}{4} D_t^2 \cdot \rho_w \\ &= 3,14/4 \times 0,469 \times 1025 &= 177,23 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

- c. Gaya Bouyancy (Fb)

$$\begin{aligned} F_b &= m_{disp} \cdot g \\ &= 177,23 \times 9,81 &= 1738,6 \text{ N/m} \end{aligned}$$

- d. Berat Terendam Pipa (Wsub)

$$\begin{aligned} W_{sub} &= (m_{st} + m_{cc} + m_c + m_{fluida}) \cdot g - F_b \\ &= (332,28 + 2,461) \times 9,81 - 1738,6 &= 1545,2 \text{ N/m} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Massa Efektif Pipa

a. Koefisien Massa Tambah (C_a)

$$C_a = \begin{cases} 0.68 + \frac{1.6}{1 + 5 \left(\frac{e}{Dt}\right)} & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) > 0.8 \end{cases}$$

$$e/dt = 0.5/0.469 = 1.066 \text{ maka } C_a = 1$$

b. Massa Tambah Pipa (M_{add})

$$\begin{aligned} M_{add} &= M_{disp} \times C_a \\ &= 177,23 \times 1 \\ &= 177,23 \text{ Kg} \end{aligned}$$

c. Massa Efektif Pipa Terendam (M_{eff})

$$\begin{aligned} M_{eff} &= M_{str} + M_{fluida} + M_{add} \\ &= 332,28 + 2,46 + 177,23 \\ &= 511,97 \text{ Kg} \end{aligned}$$

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN KECEPATAN PARTIKEL

AIR PADA PIPA

(AKIBAT ARUS DAN GELOMBANG

LAMPIRAN B

B.1 Perhitungan Kecepatan Partikel Air Akibat Gelombang

1. Data Gelombang

Tabel B.1 Data Gelombang

Data Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Kedalaman	h	56.77		m
Tinggi Gelombang Signifikan	H _s	1.08	4.17	s
Periode Gelombang Signifikan	T _s	5.51	9.0345	s

2. Parameter Spektra JONSWAP

a. Fungsi Distribusi

$$\varphi = \frac{Tp}{\sqrt{H_s}}$$

b. Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

c. Peak Enhancement Factor

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi < 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi), & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases}$$

d. Konstanta Generalised Phillips

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega p^4}{g^2} (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma)$$

Tabel B.2 Hasil Perhitungan Parameter Spektra JONSWAP

Parameter JONSWAP				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	1.08	4.17	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5.51	9.0345	s
Periode Gelombang Signifikan	ω_s	1.14	0.70	rad/s
Percepatan Gravitasi	g	9.81		m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	5.80	9.51	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	1.08	0.66	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	5.581	4.657	
<i>Peakedness Parameter</i>	γ	1.00	1.00	
Konstanta <i>Generalised Philips</i>	α	0.00522	0.01076	

3. Angka Gelombang

$$k_w h = \frac{\omega^2 \cdot h}{g} \coth(k_w h)$$

Tabel B.3 Perhitungan angka Gelombang 10 Tahun

[illegible]

Tabel B.4 Perhitungan angka Gelombang 100 Tahun

Menentukan Angka Gelombang 100 tahun								
k _w asumsi	h	g	ω	k _w h	tanh k _w h	coth k _w h	k	error
0.013	56.77	9.81	0.66	0.72	0.61	1.63	0.07	0.83
0.072	56.77	9.81	0.66	4.11	1.00	1.00	0.04	0.63
0.045	56.77	9.81	0.66	2.53	0.99	1.01	0.05	0.01
0.045	56.77	9.81	0.66	2.56	0.99	1.01	0.05	0.00
0.045	56.77	9.81	0.66	2.56	0.99	1.01	0.05	0.00
0.045	56.77	9.81	0.66	2.56	0.99	1.01	0.05	0.00
0.045	56.77	9.81	0.66	2.56	0.99	1.01	0.05	0.00
0.045	56.77	9.81	0.66	2.56	0.99	1.01	0.05	0.00
0.045	56.77	9.81	0.66	2.56	0.99	1.01	0.05	0.00
0.045	56.77	9.81	0.66	2.56	0.99	1.01	0.05	0.00

Tabel B.5 Perhitungan angka Gelombang 1 dan 100 Tahun

Angka Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Angka gelombang	k _w	0.120	0.045	-

4. Perhitungan Spektra Gelombang

a. Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

b. Fungsi Transfer G

$$G^2(\omega) = \frac{\omega \cosh(k.(D+e))}{\sinh(k.d)}$$

c. First Order Wave Theory

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

d. Spektra JONSWAP

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right)}$$

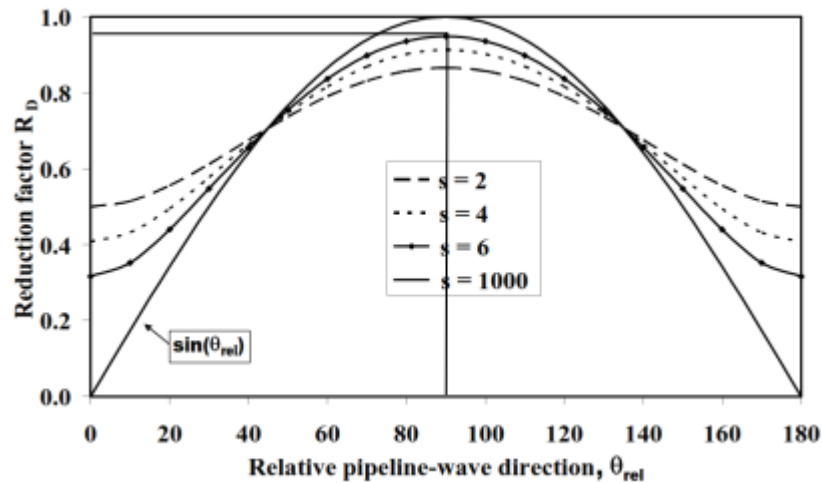
5. Kecepatan Arus Signifikan pada Pipa

$$U_s = 2\sqrt{M_0}$$

6. Mean Zero up Crossing Period

$$2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$$

7. Menentukan nilai R_D



8. Kecepatan Signifikan Arus Normal pada Pipa

$$U_w = U_s \cdot R_D$$

Tabel B.6 Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang Sesuai dengan Gap Aktual

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang $e = 0,3$				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	1.81E-03	1.24E-01	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.08	3.11	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	1.72E-03	0.12	m/s
Periode natural Gelombang	T_n	5.78		s
Osilasi Gelombang	τ	3501.967	3474.23225	

Tabel B.7 Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang Sesuai dengan Gap Aktual

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang $e = 0,5$				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	1.81E-03	1.24E-01	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.08	3.11	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	1.72E-03	0.12	m/s
Periode natural Gelombang	T_n	5.78		s
Osilasi Gelombang	τ	3501.967	3474.23225	

Tabel B.8 Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang Sesuai dengan Gap Aktual

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang $e = 0,7$				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	1.81E-03	1.24E-01	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.08	3.11	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	1.72E-03	0.12	m/s
Periode natural Gelombang	T_n	5.78		s
Osilasi Gelombang	τ	3501.967	3474.23225	

B.2 Perhitungan Kecepatan Arus *Steady* pada Pipa

Tabel B.9 Data Arus

Data Arus				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 Tahun	100 Tahun	
Kedalaman	h	56.77		m
Kecepatan Arus Di Near Bottom	$U(z_r)$	0.5	0.9	m/s

Tabel B.10 Data Parameter Arus

Parameter Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter Total Pipa	D_t	0.469	m
Diameter Luar Pipa	D_0	0.3556	m
Arah Aliran Arus	Θ_{rel}	90	°

1. Faktor Reduksi

$$R_c = \sin(\theta_{rel})$$

2. Elevasi diatas Dasar Laut

$$z = e + \frac{Dt}{2}$$

3. Parameter Kekasaran Dasar Laut

Data tanah di lokasi pipa adalah *fine to loose sand*. Nilai *seabed roughness* yang dipilih adalah *fine sand*.

Seabed	Roughness z_0 (m)
Silt	$\approx 5 \times 10^{-6}$
Fine sand	$\approx 1 \times 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \times 10^{-5}$
Coarse sand	$\approx 1 \times 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \times 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \times 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \times 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \times 10^{-2}$

$$Z_0 = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$$

4. Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa

$$U_{c,10\text{tahun}} = R_c \cdot U(z_r)_{10\text{tahun}} \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))}$$

$$U_{c,100\text{tahun}} = R_c \cdot U(z_r)_{100\text{tahun}} \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))}$$

Tabel B.11 Nilai Parameter & Perhitungan Kecepatan Arus di Setiap Bentangan
Pipa

Perhitungan Kecepatan Arus Pada Elevasi Pipa									
Panjang Span Aktual	Gap	Kecepatan Arus Pada Ketinggian Refrensi, 10 tahun U(Zr)	Kecepatan Arus Pada Di Ketinggian Refrensi, 100 Tahun U(Zr)	Faktor Reduksi	Elevasi Diatas Dasar Laut	Parameter Kekasaran Dasar Laut	Tinggi Refrensi	Kecepatan Arus	
								10 Tahun	100 Tahun
m	m	m/s	m/s	-	m	m	m	m/s	m/s
5.38	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
2.88	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
12.87	0.5	0.5	0.9	1	0.735	1.00E-05	1	0.487	0.876
3.61	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
19.15	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
6.88	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
6.98	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
7.44	0.5	0.5	0.9	1	0.735	1.00E-05	1	0.487	0.876
16.08	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
4.39	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
7.68	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
12.11	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
11.89	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
11.38	0.5	0.5	0.9	1	0.735	1.00E-05	1	0.487	0.876
10.63	0.5	0.5	0.9	1	0.735	1.00E-05	1	0.487	0.876
10.41	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
15.54	0.7	0.5	0.9	1	0.935	1.00E-05	1	0.497	0.895
6.73	0.3	0.5	0.9	1	0.535	1.00E-05	1	0.473	0.851
12.65	0.2	0.5	0.9	1	0.435	1.00E-05	1	0.464	0.835
8.63	0.1	0.5	0.9	1	0.335	1.00E-05	1	0.452	0.814

B.3 Perhitungan Kecepatan Arus Total

Nilai Kecepatan arus total merupakan hasil penjumlahan dari kecepatan arus akibat gelombang (U_w) dan kecepatan arus pada elevasi pipa (U_c).

Tabel B.11 Nilai Parameter & Perhitungan Kecepatan Arus Total

Panjang Span	gap (e)	Uc		Uw		Kecepatan Arus Total	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
5.38	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
2.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
12.87	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
3.61	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
19.15	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
6.88	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
6.98	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
7.44	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
16.08	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969

Tabel B.11 Nilai Parameter & Perhitungan Kecepatan Arus Total (Lanjutan)

Panjang Span	gap (e)	Uc		Uw		Kecepatan Arus Total	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
4.39	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
7.68	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
12.11	0.3	0.473	0.851	0.005	0.118	0.478	0.969
11.89	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
11.38	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
10.63	0.5	0.487	0.876	0.002	0.118	0.488	0.994
10.41	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
15.54	0.7	0.497	0.895	0.002	0.118	0.499	1.013
6.73	0.3	0.473	0.851	0.002	0.118	0.475	0.969
12.65	0.2	0.464	0.835	0.002	0.118	0.466	0.953
8.63	0.1	0.452	0.814	0.002	0.118	0.454	0.933

LAMPIRAN C

PERHITUNGAN *VORTEX INDUCED*

VIBRATION

LAMPIRAN C

C.1 Perhitungan Parameter VIV

1. Data Parameter VIV

Tabel C.1 Data Parameter VIV

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		10 tahun	100 Tahun	
Densitas Air Laut	ρ_w	1025		kg/m ³
<i>Soil damping</i>	ζ_{soil}	0.01		-
<i>Structural damping</i>	ζ_{str}	0.025		-
Kekasaran permukaan pipa	k	0.003		m
Diameter total pipa	D_t	0.469		m
Rasio k/ D_t	k/D_t	0.007		-
frekuensi gelombang signifikan	ω_s	1.14	0.70	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	ν_k	1.02E-06		m ² /s
Frekuensi Natural	f_n	0.415695245		

2. Parameter *Vortex Induced Vibrations*

a. Frekuensi *Vortex Shedding*

$$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right) = 0.208$$

Tabel C.2 Hasil Perhitungan Parameter Frekuensi *Vortex Shedding*

L	Uc		Uw		fs
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	hz
5.38	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
2.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
12.87	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.208
3.61	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
19.15	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
6.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
6.98	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
7.44	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.208
16.08	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
4.39	0.473	0.851	1.72E-03	1.18E-01	0.202
7.68	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
12.11	0.473	0.851	4.74E-03	1.18E-01	0.204
11.89	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202

Tabel C.2 Hasil Perhitungan Parameter Frekuensi *Vortex Shedding* (lanjutan)

L	Uc		Uw		fs
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	hz
11.38	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.208
10.63	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.208
10.41	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
15.54	0.497	0.895	1.72E-03	1.18E-01	0.213
6.73	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.202
12.65	0.464	0.835	1.71E-03	1.18E-01	0.198
8.63	0.452	0.814	1.71E-03	1.18E-01	0.194

b. *Reynolds Number*

$$R_e = \left(\frac{U_{tot} \cdot Dt}{\nu} \right) = 4.57 \times 10^5$$

Tabel C.3 Hasil Perhitungan Parameter *Reynolds Number*

L	e	Uc		Uw		Re	
		10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
5.38	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
2.88	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
12.87	0.5	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	2.25E+05	4.57E+05
3.61	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
19.15	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
6.88	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
6.98	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
7.44	0.5	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	2.25E+05	4.57E+05
16.08	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
4.39	0.3	0.473	0.851	1.72E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
7.68	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
12.11	0.3	0.473	0.851	4.74E-03	1.18E-01	2.20E+05	4.46E+05
11.89	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
11.38	0.5	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	2.25E+05	4.57E+05
10.63	0.5	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	2.25E+05	4.57E+05
10.41	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
15.54	0.7	0.497	0.895	1.72E-03	1.18E-01	2.29E+05	4.66E+05
6.73	0.3	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	2.18E+05	4.46E+05
12.65	0.2	0.464	0.835	1.71E-03	1.18E-01	2.14E+05	4.38E+05
8.63	0.1	0.452	0.814	1.71E-03	1.18E-01	2.09E+05	4.29E+05

c. *Stability Parameter*

$$K_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot m_e \cdot \zeta_T}{\rho_w \cdot Dt^2} = 0.713$$

Tabel C.4 Hasil Perhitungan Parameter *Stability Parameter*

L	e	m _e	K _{sd}
5.38	0.3	522.819	0.728
2.88	0.3	522.819	0.728
12.87	0.5	511.967	0.713
3.61	0.3	522.819	0.728
19.15	0.3	522.819	0.728
6.88	0.3	522.819	0.728
6.98	0.3	522.819	0.728
7.44	0.5	511.967	0.713
16.08	0.3	522.819	0.728
4.39	0.3	522.819	0.728
7.68	0.3	522.819	0.728
12.11	0.3	522.819	0.728
11.89	0.3	522.819	0.728
11.38	0.5	511.967	0.713
10.63	0.5	511.967	0.713
10.41	0.3	522.819	0.728
15.54	0.7	511.967	0.713
6.73	0.3	522.819	0.728
12.65	0.2	545.812	0.760
8.63	0.1	592.530	0.825

d. *Reduced Velocity*

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n \cdot Dt} = 5.097$$

Tabel C.5 Hasil Perhitungan Parameter *Reduced Velocity*

L	U _c		U _w		V _{rd}
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
5.38	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
2.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
12.87	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	5.097

Tabel C.5 Hasil Perhitungan Parameter *Reduced Velocity* (lanjutan)

L	Uc		Uw		Vrd
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
3.61	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
19.15	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
6.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
6.98	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
7.44	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	5.097
16.08	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
4.39	0.473	0.851	1.72E-03	1.18E-01	4.970
7.68	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
12.11	0.473	0.851	4.74E-03	1.18E-01	4.969
11.89	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
11.38	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	5.097
10.63	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	5.097
10.41	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
15.54	0.497	0.895	1.72E-03	1.18E-01	5.193
6.73	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	4.969
12.65	0.464	0.835	1.71E-03	1.18E-01	4.886
8.63	0.452	0.814	1.71E-03	1.18E-01	4.782

e. *Keulegan Carpenter Number*

$$KC = \frac{U_w}{f_w \cdot D_t} = 0.36$$

Tabel C.6 Hasil Perhitungan Parameter *Keulegan Carpenter Number*

L	Uc		Uw		KC	
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
5.38	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
2.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
12.87	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.00321	0.36
3.61	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
19.15	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
6.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
6.98	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36

Tabel C.6 Hasil Perhitungan Parameter *Keulegan Carpenter Number* (lanjutan)

L	Uc		Uw		KC	
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun
7.44	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.00321	0.36
16.08	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
4.39	0.473	0.851	1.72E-03	1.18E-01	0.00321	0.36
7.68	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
12.11	0.473	0.851	4.74E-03	1.18E-01	0.00886	0.36
11.89	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
11.38	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.00321	0.36
10.63	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.00321	0.36
10.41	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
15.54	0.497	0.895	1.72E-03	1.18E-01	0.00321	0.36
6.73	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
12.65	0.464	0.835	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36
8.63	0.452	0.814	1.71E-03	1.18E-01	0.0032	0.36

f. *Current flow ratio*

$$\alpha = \frac{U_{c100 \text{ tahun}}}{U_{c100 \text{ tahun}} \cdot U_{w1 \text{ tahun}}} = 0.998$$

Tabel C.7 Hasil Perhitungan Parameter *current flow ratio*

L	Uc		Uw		α
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
5.38	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
2.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
12.87	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.998
3.61	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
19.15	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
6.88	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
6.98	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
7.44	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.998
16.08	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
4.39	0.473	0.851	1.72E-03	1.18E-01	0.998
7.68	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
12.11	0.473	0.851	4.74E-03	1.18E-01	0.994
11.89	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
11.38	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.998

Tabel C.7 Hasil Perhitungan Parameter *current flow ratio* (lanjutan)

L	U _c		U _w		α
	10 tahun	100 tahun	10 tahun	100 tahun	
10.63	0.487	0.876	1.72E-03	1.18E-01	0.998
10.41	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
15.54	0.497	0.895	1.72E-03	1.18E-01	0.998
6.73	0.473	0.851	1.71E-03	1.18E-01	0.998
12.65	0.464	0.835	1.71E-03	1.18E-01	0.998
8.63	0.452	0.814	1.71E-03	1.18E-01	0.998

LAMPIRAN D

PERHITUNGAN *DYNAMIC SOIL*
STIFFNESS* DAN *CONCRETE STIFFNESS
FACTOR

LAMPIRAN D

D.1 *Dynamic Soil Stiffness*

1. Data Awal Parameter Gaya Drag

Tabel D.1 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter <i>Dynamic Soil Stiffness</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> vertikal	C_v	16000	$\text{kN/m}^{5/2}$
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> horizontal	C_L	12000	$\text{kN/m}^{5/2}$
<i>Poisson ratio</i> tanah vertikal (corroded)	$V_{\text{soil},V}$	0.35	-
<i>Poisson ratio</i> tanah horizontal (corroded)	$V_{\text{soil},L}$	0.35	-
Massa pipa di udara	-	334.74	kg/m
Massa air yang dipindahkan	m_{disp}	177.23	kg/m
Diameter total pipa	D_t	0.469	m

2. Perhitungan *Dynamic Soil stiffness*

a. Rasio Massa Spesifik

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \left(\frac{334.74}{177.23} \right) = 1,889$$

b. Koefisien *Dynamic Soil Stiffness*

Table 7-7 Dynamic stiffness factor and static stiffness for pipe-soil interaction in sand.			
Sand type	C_v ($\text{kN/m}^{5/2}$)	C_L ($\text{kN/m}^{5/2}$)	$K_{v,s}$ (kN/m/m)
Loose	16000	12000	250
Medium	22000	16500	530
Dense	32000	24000	1350

c. *Poisson ratio* Tanah

Soil Type	s_u (kN/m^2)	γ'_{soil} (kN/m^3)	v	e_s
Soft	12,5 – 25	5 – 8	0,45	0,8 – 2,5
Firm	25 – 50	6 – 11	0,45	0,5 – 2,0
Stiff	50 – 100	7 – 12	0,45	0,4 – 1,7
Very Stiff	100 – 200	10 – 13	0,45	0,3 – 0,9
Hard	> 200	10 - 13	0,45	0,3 – 0,9

d. *Dynamic Soil stiffness Vertikal*

$$K_v = \frac{c_v}{1-v_{soil}} \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{Dt} = 17621.27 \text{ kN/m}^2$$

e. *Dynamic Soil stiffness*

$$K_L = C_L(1 + v_{soil}) \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{Dt} = 13523.71 \text{ kN/m}^2$$

D.2 Concrete Stiffness Factor

Tabel D.2 Parameter perhitungan *Concrete Stiffness Factor*

Parameter Concrete Stiffness Factor			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Konstanta Empiris (Asphalt)	K _c	0.331	-
Momen Inersia Pipa Baja	I _{st}	2.24e-04	m ⁴
Momen Inersia Selimut Beton	I _{conc}	1.48e-03	m ⁴
<i>Young's Modulus</i> Pipa Baja	E _{st}	2,07 x 10 ¹¹	Pa
Kekuatan Material Selimut Beton	F _{cn}	45.00	MPa

a. *Young Modulus Selimut Beton*

$$E_{conc} = 1000 \times (f_{cn})^{0.3} = 31330.24 \text{ MPa}$$

b. *Concrete Stiffness factor*

$$CSF = k_c \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{stell}} \right)^{0.75} = 0.331$$

LAMPIRAN E

PERHITUNGAN *PANJANG SPAN EFEKTIF,*
EFFECTIVE AXIAL FORCE, CRITICAL
BUCKLING LOAD, STATIC DEFLECTION, dan
FREKUENSI NATURAL PIPA

LAMPIRAN E

E.1 Panjang *Span* Efektif

1. Data Awal Parameter Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Tabel E.1 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter Perhitungan β			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Dynamic soil stiffness</i> vertikal	K_v	1.76E+07	N/m ²
<i>Dynamic soil stiffness</i> horizontal	K_L	1.33E+07	N/m ²
<i>Concrete Stiffness Factor</i>	CSF	0.331	-
momen inersia pipa baja	I_{st}	2.24E-04	m ⁴
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

2. Perhitungan Panjang *Span* Efektif

a. Parameter β

$$\beta = \log_{10}\left(\frac{K \cdot L^4}{(1+CSF)E_{st}I_{st}}\right)$$

b. Panjang *Span* Efektif Pipa

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{-0,066\beta^2 + 1,02\beta + 0,63} & , \text{untuk } \beta \geq 2,7 \\ \frac{4,73}{0,036\beta^2 + 0,6\beta + 1,0} & , \text{untuk } \beta < 2,7 \end{cases}$$

Tabel E.2 Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Cross-Flow				In-Line			
L m	β □	L_{eff}/L	L_{eff} m	L m	β □	L_{eff}/L	L_{eff} m
5.38	2.380	1.781	9.585	5.38	2.26	1.85	9.94
2.88	1.293	2.558	7.364	2.88	1.17	2.68	7.73
12.87	3.895	1.313	16.902	12.87	3.77	1.34	17.21
3.61	1.684	2.221	8.008	3.61	1.56	2.32	8.36
19.15	4.585	1.207	23.109	19.15	4.46	1.22	23.42
6.88	2.807	1.591	10.948	6.88	2.68	1.63	11.24
6.98	2.831	1.583	11.043	6.98	2.71	1.63	11.35
7.44	2.943	1.546	11.501	7.44	2.82	1.59	11.81
16.08	4.281	1.249	20.080	16.08	4.16	1.27	20.39

Tabel E.2 Perhitungan Panjang Span Efektif (lanjutan)

Cross-Flow				In-Line			
L m	β □	L_{eff}/L	L_{eff} m	L m	β □	L_{eff}/L	L_{eff} m
4.39	2.025	1.985	8.707	4.39	1.90	2.07	9.06
7.68	2.999	1.528	11.742	7.68	2.87	1.57	12.05
12.11	3.789	1.333	16.146	12.11	3.67	1.36	16.45
11.89	3.758	1.340	15.932	11.89	3.63	1.37	16.23
11.38	3.682	1.355	15.427	11.38	3.56	1.38	15.73
10.63	3.563	1.381	14.676	10.63	3.44	1.41	14.98
10.41	3.526	1.389	14.453	10.41	3.40	1.42	14.75
15.54	4.223	1.258	19.552	15.54	4.10	1.28	19.86
6.73	2.768	1.605	10.795	6.73	2.64	1.65	11.11
12.65	3.865	1.319	16.685	12.65	3.74	1.34	16.99
8.63	3.200	1.470	12.681	8.63	3.08	1.50	12.98

E.2 Boundary Condition (C_{1-6})

Kondisi batas yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *fixed-fixed*, maka koefisien batas sesuai dengan tabel di awah ini beserta keterangannya.

Tabel E.3 Koefisien Boundary Condition

	<i>Pinned-pinned</i> ⁽²⁾	<i>Fixed-fixed</i> ⁽³⁾	<i>Single Span on seabed</i>
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1.0	4.0	4.0
C_3	0.8 ⁽¹⁾	0.2 ⁽¹⁾	0.4 ⁽¹⁾
C_4	4.93	14.1	Shoulder: $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ Midspan: 8.6
C_5	1/8	1/12	Shoulder ⁽⁴⁾ : $14.1 (L/L_{eff})^2$ Midspan: 8.6
C_6	5/384	1/384	1/384
1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line direction if the steady current is not accounted for. 2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} shall be replaced by L in all expressions, including the expression for P_{cr} . 3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition. 4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.			

E.3 *Effective Axial Force*

Tabel E.4 Parameter Perhitungan Effective Axial Force

Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Perbedaan tekanan	ΔP	9.36E+06	Pa
<i>Poisson's ratio</i> baja	ν_{st}	0.30	-
diameter dalam pipa	D_i	0.33	m
luas penampang internal pipa baja	A_i	0.08	m ²
luas penampang pipa baja	A_{st}	1.53E-02	m ²
Koefisien <i>thermal expansion</i>	α_e	1.17E-05	/ ⁰ C
Temperatur Operasi	T_1	65.00	⁰ C
Temperatur air laut	T_0	25.00	⁰ C
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

Perhitungan effective axial force:

$$\begin{aligned}
 S_{eff} &= H_{eff} - (1 - 2\nu) \cdot P_i \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot A_{st} \\
 &= -1.8 \times 10^6 \text{ N}
 \end{aligned}$$

E.4 *Critical Buckling Load*

Tabel E.5 Parameter Perhitungan Effective Axial Force

Parameter Perhitungan <i>Critical Buckling Load</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete Stiffness Factor</i>	CSF	0.331	-
<i>Young's Modulus</i> Pipa Baja	E_{st}	2.07E+11	Pa
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	2.24E-04	m ⁴
Boundary Condition	C_2	4.00	-

Perhitungan *Critical buckling load*:

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= (1 + CSF) C_2 \pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2} \\
 P_{cr} &= (1 + 0.331) 4\pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2}
 \end{aligned}$$

Tabel E.6 Perhitungan Effective Axial Force

Cross-Flow			In-Line		
L	L _{eff}	P _{cr}	L	L _{eff}	P _{cr}
m	m	N	m	m	N
5.38	9.58	2.65E+07	5.38	9.94	2.46E+07
2.88	7.36	4.48E+07	2.88	7.73	4.08E+07
12.87	16.90	8.51E+06	12.87	17.21	8.22E+06
3.61	8.01	3.79E+07	3.61	8.36	3.48E+07
19.15	23.11	4.55E+06	19.15	23.42	4.43E+06
6.88	10.95	2.03E+07	6.88	11.24	1.93E+07
6.98	11.04	1.99E+07	6.98	11.35	1.89E+07
7.44	11.50	1.84E+07	7.44	11.81	1.75E+07
16.08	20.08	6.03E+06	16.08	20.39	5.85E+06
4.39	8.71	3.21E+07	4.39	9.06	2.96E+07
7.68	11.74	1.76E+07	7.68	12.05	1.68E+07
12.11	16.15	9.33E+06	12.11	16.45	8.99E+06
11.89	15.93	9.58E+06	11.89	16.23	9.23E+06
11.38	15.43	1.02E+07	11.38	15.73	9.83E+06
10.63	14.68	1.13E+07	10.63	14.98	1.08E+07
10.41	14.45	1.16E+07	10.41	14.75	1.12E+07
15.54	19.55	6.36E+06	15.54	19.86	6.17E+06
6.73	10.80	2.09E+07	6.73	11.11	1.97E+07
12.65	16.69	8.74E+06	12.65	16.99	8.43E+06
8.63	12.68	1.51E+07	8.63	12.98	1.44E+07

E.5 Static Deflection

Tabel E.7 Parameter Perhitungan *Static Deflection*

Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.331	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E _{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I _{st}	2.24E-04	m ⁴
Boundary condition	C ₆	0.0026	-
Effective Axial Force	S _{eff}	-1.80E+06	N
Berat terendam pipa (<i>q cross-flow</i>)	W _{sub}	1545.20	N/m

Perhitungan *Static deflection* :

$$\delta = C_6 \pi^2 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{E_{st} I_{st} \cdot (1 + CSF)} \cdot \frac{1}{(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}})}$$

Tabel E.8 Perhitungan *Static Deflection (In-line)*

In-Line				
L	L_{eff}	P_{cr}	F_{tot}	δ
m	m	N		m
5.38	9.94	2.46E+07	238.341	1.06E-04
2.88	7.73	4.08E+07	238.341	3.75E-05
12.87	17.21	8.22E+06	250.737	1.19E-03
3.61	8.36	3.48E+07	238.341	5.19E-05
19.15	23.42	4.43E+06	238.341	5.10E-03
6.88	11.24	1.93E+07	238.341	1.77E-04
6.98	11.35	1.89E+07	238.341	1.85E-04
7.44	11.81	1.75E+07	250.737	2.30E-04
16.08	20.39	5.85E+06	238.341	2.51E-03
4.39	9.06	2.96E+07	238.361	7.23E-05
7.68	12.05	1.68E+07	238.341	2.38E-04
12.11	16.45	8.99E+06	238.341	9.22E-04
11.89	16.23	9.23E+06	238.341	8.69E-04
11.38	15.73	9.83E+06	250.737	7.94E-04
10.63	14.98	1.08E+07	250.737	6.39E-04
10.41	14.75	1.12E+07	238.341	5.69E-04
15.54	19.86	6.17E+06	260.322	2.42E-03
6.73	11.11	1.97E+07	238.341	1.69E-04
12.65	16.99	8.43E+06	230.446	1.03E-03
8.63	12.98	1.44E+07	220.666	3.03E-04

Tabel E.9 Perhitungan *Static Deflection (cross-flow)*

Cross-Flow			
L	L_{eff}	P_{cr}	δ
m	m	N	m
5.38	9.58	2.65E+07	5.91E-04
2.88	7.36	4.48E+07	2.00E-04
12.87	16.90	8.51E+06	6.76E-03
3.61	8.01	3.79E+07	2.82E-04
19.15	23.11	4.55E+06	3.08E-02
6.88	10.95	2.03E+07	1.03E-03
6.98	11.04	1.99E+07	1.07E-03
7.44	11.50	1.84E+07	1.27E-03
16.08	20.08	6.03E+06	1.51E-02

Tabel E.9 Perhitungan *Static Deflection (cross-flow)* lanjutan

Cross-Flow			
L	L _{eff}	P _{cr}	δ
m	m	N	m
4.39	8.71	3.21E+07	3.98E-04
7.68	11.74	1.76E+07	1.38E-03
12.11	16.15	9.33E+06	5.50E-03
11.89	15.93	9.58E+06	5.18E-03
11.38	15.43	1.02E+07	4.49E-03
10.63	14.68	1.13E+07	3.60E-03
10.41	14.45	1.16E+07	3.37E-03
15.54	19.55	6.36E+06	1.33E-02
6.73	10.80	2.09E+07	9.71E-04
12.65	16.69	8.74E+06	6.38E-03
8.63	12.68	1.51E+07	1.92E-03

E.6 Frekuensi Natural Pipa

Tabel E.10 Parameter Perhitungan *Frekuensi Natural Pipa*

Parameter Perhitungan <i>Fundamental Natural Frequency</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.331	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E _{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I _{st}	2.24E-04	m ⁴
Boundary condition	C ₁	3.56	-
	C ₃	0.20	-
Effective Axial Force	S _{eff}	-1.80E+06	N
Diameter total pipa	D _t	0.47	m

Perhitungan Frekuensi natural pipa:

$$f_1 = C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{E_{st} I_{st}}{m_e L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t} \right)^2 \right)}$$

Tabel E.11 Perhitungan *Frekuensi Natural Pipa (In-line)*

In-Line					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	me	f ₁
m	m	N	m		Hz
5.4	9.945	2.46E+07	1.06E-04	522.82	11.90
2.9	7.726	4.08E+07	3.75E-05	522.82	20.02
12.9	17.206	8.22E+06	1.19E-03	511.97	3.69
3.6	8.362	3.48E+07	5.19E-05	522.82	17.02
19.1	23.421	4.43E+06	5.10E-03	522.82	1.72
6.9	11.239	1.93E+07	1.77E-04	522.82	9.21
7.0	11.350	1.89E+07	1.85E-04	522.82	9.02
7.4	11.806	1.75E+07	2.30E-04	511.97	8.39
16.1	20.389	5.85E+06	2.51E-03	522.82	2.45
4.4	9.061	2.96E+07	7.23E-05	522.82	14.43
7.7	12.047	1.68E+07	2.38E-04	522.82	7.96
12.1	16.449	8.99E+06	9.22E-04	522.82	4.04
11.9	16.235	9.23E+06	8.69E-04	522.82	4.16
11.4	15.729	9.83E+06	7.94E-04	511.97	4.51
10.6	14.977	1.08E+07	6.39E-04	511.97	5.03
10.4	14.754	1.12E+07	5.69E-04	522.82	5.14
15.5	19.860	6.17E+06	2.42E-03	511.97	2.63
6.7	11.108	1.97E+07	1.69E-04	522.82	9.44
12.7	16.989	8.43E+06	1.03E-03	545.81	3.68
8.6	12.983	1.44E+07	3.03E-04	592.53	6.37

Tabel E.12 Perhitungan *Frekuensi Natural Pipa (cross-flow)*

Cross-Flow					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	me	f ₁
m	m	N	m	kg/m	Hz
5.4	9.585	2.65E+07	5.91E-04	522.82	12.8
2.9	7.364	4.48E+07	2.00E-04	522.82	22.1
12.9	16.902	8.51E+06	6.76E-03	511.97	3.8
3.6	8.008	3.79E+07	2.82E-04	522.82	18.6
19.1	23.109	4.55E+06	3.08E-02	522.82	1.8
6.9	10.948	2.03E+07	1.03E-03	522.82	9.7
7.0	11.043	1.99E+07	1.07E-03	522.82	9.6
7.4	11.501	1.84E+07	1.27E-03	511.97	8.9
16.1	20.080	6.03E+06	1.51E-02	522.82	2.5

Tabel E.12 Perhitungan *Frekuensi Natural Pipa (cross-flow) lanjutan*

Cross-Flow					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	me	f ₁
m	m	N	m	kg/m	Hz
4.4	8.707	3.21E+07	3.98E-04	522.82	15.7
7.7	11.742	1.76E+07	1.38E-03	522.82	8.4
12.1	16.146	9.33E+06	5.50E-03	522.82	4.2
11.9	15.932	9.58E+06	5.18E-03	522.82	4.3
11.4	15.427	1.02E+07	4.49E-03	511.97	4.7
10.6	14.676	1.13E+07	3.60E-03	511.97	5.3
10.4	14.453	1.16E+07	3.37E-03	522.82	5.4
15.5	19.552	6.36E+06	1.33E-02	511.97	2.7
6.7	10.795	2.09E+07	9.71E-04	522.82	10.0
12.7	16.685	8.74E+06	6.38E-03	545.81	3.8
8.6	12.681	1.51E+07	1.92E-03	592.53	6.7

LAMPIRAN F

SCREENING ALLOWABLE SPAN DAN

KRITERIA FATIGUE

LAMPIRAN F

F.1 Screening Panjang Span

Tabel F.1 Perhitungan Kriteria L/D

No.	Kilometre Point (km)	Gap (m)	Panjang Bentangan	L/D	Keterangan L/D < 30
1	11.992 - 11.998	0.3	5.38	11.47	SCREENING FATIGUE
2	12.058 - 12.061	0.3	2.88	6.14	SCREENING FATIGUE
3	12.126 - 12.14	0.5	12.87	27.43	SCREENING FATIGUE
4	12.239 - 12.243	0.3	3.61	7.68	SCREENING FATIGUE
5	12.284 - 12.302	0.3	19.15	40.81	GAGAL STATIS
6	12.34 - 12.347	0.3	6.88	14.67	SCREENING FATIGUE
7	12.397 - 12.404	0.3	6.98	14.87	SCREENING FATIGUE
8	12.572 - 12.579	0.5	7.44	15.86	SCREENING FATIGUE
9	12.6 - 12.616	0.3	16.08	34.27	GAGAL STATIS
10	12.625 - 12.628	0.3	4.39	9.35	SCREENING FATIGUE
11	12.631 - 12.638	0.3	7.68	16.38	SCREENING FATIGUE
12	12.647 - 12.659	0.3	12.11	25.81	SCREENING FATIGUE
13	12.697 - 12.709	0.3	11.89	25.35	SCREENING FATIGUE
14	12.723 - 12.735	0.5	11.38	24.26	SCREENING FATIGUE
15	12.736 - 12.747	0.5	10.63	22.66	SCREENING FATIGUE
16	12.768 - 12.778	0.3	10.41	22.18	SCREENING FATIGUE
17	12.806 - 12.821	0.7	15.54	33.13	GAGAL STATIS
18	12.828 - 12.836	0.3	6.73	14.34	SCREENING FATIGUE
19	12.857 - 12.869	0.2	12.65	26.96	SCREENING FATIGUE
20	12.993 - 13.002	0.1	8.63	18.39	SCREENING FATIGUE

1. Perhitungan Kriteria Screening Fatigue

a. In-Line

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/Dt}{250}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\alpha}}$$

Dengan nilai reduced velocity onset adalah dengan persamaan berikut:

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{untuk } K_{sd} < 0,4 \\ \left(\frac{0,6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}}\right) & ; \text{untuk } K_{sd} \text{ } 0,4 < K_{sd} < 1,6 \\ \frac{2,2}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{untuk } K_{sd} > 1,6 \end{cases}$$

Tabel F.2 Perhitungan Kriteria Screening Fatigue In-line

In-Line							
L	f _{n, IL}	f _{n, IL} / γ _{IL}	V _R ^{IL} _{onset}	Uc 100 year	α	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s			
5.38	11.90	10.82	1.21	0.85	0.998	1.44	LOLOS
2.88	20.02	18.20	1.21	0.85	0.998	1.47	LOLOS
12.87	3.69	3.35	1.19	0.88	0.998	1.40	LOLOS
3.61	17.02	15.47	1.21	0.85	0.998	1.46	LOLOS
19.15	1.72	1.56	1.21	0.85	0.998	1.26	TIDAK LOLOS
6.88	9.21	8.37	1.21	0.85	0.998	1.42	LOLOS
6.98	9.02	8.20	1.21	0.85	0.998	1.42	LOLOS
7.44	8.39	7.63	1.19	0.88	0.998	1.47	LOLOS
16.08	2.45	2.22	1.21	0.85	0.998	1.30	TIDAK LOLOS
4.39	14.43	13.11	1.21	0.85	0.998	1.45	LOLOS
7.68	7.96	7.23	1.21	0.85	0.998	1.41	LOLOS
12.11	4.04	3.67	1.21	0.85	0.994	1.35	LOLOS
11.89	4.16	3.78	1.21	0.85	0.998	1.35	LOLOS
11.38	4.51	4.10	1.19	0.88	0.998	1.42	LOLOS
10.63	5.03	4.57	1.19	0.88	0.998	1.43	LOLOS
10.41	5.14	4.67	1.21	0.85	0.998	1.37	LOLOS
15.54	2.63	2.40	1.19	0.89	0.998	1.39	TIDAK LOLOS

b. *Cross-Flow*

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100 \text{ tahun}} + U_{w,1 \text{ tahun}}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t}$$

Dengan nilai reduced velocity onset adalah dengan persamaan berikut:

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \Psi_{proxi,onset} \cdot \Psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}}$$

Tabel F.3 Perhitungan Kriteria *Screening Fatigue In-line*

Cross-Flow							
L	f _{n, CF}	f _{n, CF} / γ _{CF}	V _{Rcfonset}	U _c 100 year	U _w 1 year	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s	m/s		
5.38	12.84	10.70	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
2.88	22.08	18.40	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
12.87	3.84	3.20	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
3.61	18.60	15.50	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
19.15	1.78	1.48	2.40	0.85	0.002	0.76	TIDAK LOLOS
6.88	9.73	8.11	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
6.98	9.56	7.97	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
7.44	8.87	7.39	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
16.08	2.54	2.12	2.40	0.85	0.002	0.76	TIDAK LOLOS
4.39	15.66	13.05	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
7.68	8.40	7.00	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
12.11	4.21	3.51	2.40	0.85	0.005	0.76	LOLOS
11.89	4.34	3.62	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
11.38	4.71	3.93	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
10.63	5.26	4.38	2.50	0.88	0.002	0.75	LOLOS
10.41	5.38	4.48	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
15.54	2.74	2.28	2.50	0.89	0.002	0.76	TIDAK LOLOS
6.73	10.02	8.35	2.40	0.85	0.002	0.76	LOLOS
12.65	3.83	3.19	2.27	0.83	0.002	0.79	LOLOS
8.63	6.70	5.58	2.13	0.81	0.002	0.82	LOLOS

LAMPIRAN G

PERHITUNGAN *RESPONSE MODEL*

LAMPIRAN G

G.1 *In-Line Response Model*

1. Perhitungan nilai reduced Velocity Onset

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{untuk } K_{sd} < 0,4 \\ \frac{0,6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{untuk } K_{sd} \ 0,4 < K_{sd} < 1,6 \\ \frac{2,2}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{untuk } K_{sd} > 1,6 \end{cases}$$

2. Perhitungan nilai Reduced Velocity 1

$$V_{R,1}^{IL} = 10 \cdot \left(\frac{A_{Y,1}}{D} \right) + V_{R,onset}^{IL}$$

3. Perhitungan nilai Reduced Velocity 2

$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,end}^{IL} - 2 \cdot \left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right)$$

4. Perhitungan nilai Reduced Velocity End

$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4.5 - 0.8 K_{sd} & \text{for } K_{sd} < 1.0 \\ 3.7 & \text{for } K_{sd} \geq 1.0 \end{cases}$$

5. Perhitungan nilai stress amplitude ratio 1

$$\left(\frac{A_{Y,1}}{D} \right) = \max \left(0.18 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2} \right) \cdot R_{I0,1}; \left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right) \right)$$

6. Perhitungan nilai stress amplitude ratio 2

$$\left(\frac{A_{Y,2}}{D} \right) = 0.13 \cdot \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.8} \right) \cdot R_{I0,2}$$

7. Perhitungan nilai reduction 1

$$R_{I0,1} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2} \cdot \theta_{rel} \right) (I_c - 0.03) \quad 0 \leq R_{I0,1} \leq 1$$

8. Perhitungan nilai reduction 2

$$R_{I0,2} = 1.0 - \frac{(\hat{I}_c - 0.03)}{0.17} \quad 0 \leq R_{I0,2} \leq 1$$

Tabel G.1 Hasil Perhitungan *Response Model*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$R_{1\theta}$	0.86
$R_{2\theta}$	0.47
$\frac{A_{y,1}}{D}$	0.061
$\frac{A_{y,2}}{D}$	0.036
$V_{r,onset}^{IL}$	1.207
$V_{r,1}^{IL}$	1.82
$V_{r,2}^{IL}$	3.84
$V_{r,end}^{IL}$	3.91

G.2 *Cross Flow Response Model*

1. Perhitungan nilai reduced Velocity Onset

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \cdot \Psi_{\text{proxi,onset}} \cdot \Psi_{\text{mass,onset}} \cdot \Psi_{\alpha,onset} \cdot \Psi_{\text{trench,onset}}}{\gamma_{on}}$$

- a. $\Psi_{\text{proxi,onset}}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk jarak dasar laut, dimana :

$$\Psi_{\text{proxi,onset}} = \begin{cases} \frac{1}{4} (3 + 1.25 \frac{e}{D}) & \text{for } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$

- b. $\Psi_{\text{mass,onset}}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *specific gravity* dari pipa, dimana :

$$\Psi_{\text{mass,onset}} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \frac{\rho_s}{\rho} & \text{for } \frac{\rho_s}{\rho} < 1.5 \\ 1 & \text{else} \end{cases}$$

- c. $\Psi_{\alpha,onset}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *current wave ratio*, dimana :

$$\Psi_{\alpha,onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3} & \text{for } \alpha < 0.5 \\ 1.167 & \text{else} \end{cases}$$

- d. $\psi_{\text{trench,onset}}$ adalah perhitungan faktor koreksi untuk *current wave ratio*,
dimana :

$$\psi_{\text{trench,onset}} = 1 + 0.5 \frac{\Delta}{D}, \quad \frac{\Delta}{D} = \frac{1.25d - e}{D}$$

2. Perhitungan nilai Reduced Velocity 1

$$V_{R,1}^{CF} = 5$$

3. Perhitungan nilai Reduced Velocity 2

$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,\text{end}}^{CF} - \left(\frac{9}{1.3} \right) \cdot \left(\frac{A_{Z,1}}{D} \right)$$

4. Perhitungan nilai Reduced Velocity End

$$V_{R,\text{end}}^{CF} = 16$$

5. Perhitungan nilai stress amplitude ratio 1

$$\left(\frac{A_{Z,1}}{D} \right) = \begin{cases} 1.3 & \alpha > 0.8 & \text{all KC} \\ 0.7 & & \text{KC} < 10 \\ 0.7 + 0.01 \cdot (\text{KC} - 10) & \alpha \leq 0.8 & 10 \leq \text{KC} \leq 30 \\ 0.9 & & \text{KC} > 30 \end{cases}$$

6. Perhitungan nilai stress amplitude ratio 2

$$\left(\frac{A_{Z,2}}{D} \right) = \left(\frac{A_{Z,1}}{D} \right)$$

Tabel G.2 Hasil Perhitungan *Response Model*

Parameter <i>Response Model</i>	
Parameter	Nilai
$\frac{A_{Z,1}}{D}$	0.9
$\frac{A_{Z,2}}{D}$	0.9
$V_{r,\text{onset}}^{CF}$	2.982
$V_{r,1}^{CF}$	5.6
$V_{r,2}^{CF}$	15.51
$V_{r,\text{end}}^{CF}$	16

LAMPIRAN H

PERHITUNGAN *UNIT STRESS AMPLITUDE*
DAN STRESS RANGE

LAMPIRAN H

H.1 Unit Stress Amplitude

1. Data Awal Parameter Perhitungan Unit Stress Amplitude

Tabel H.1 Parameter Perhitungan Unit Stress Amplitude

Perhitungan Unit Stress Amplitude		
Parameter	Notasi	Nilai
C4	C4	14.1
Diameter total	Dt	0.4692
Diameter pipa	OD	0.3556
modulus young baja	E	2.07E+11
wall thickness	t	0.0143
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.331

2. Perhitungan Unit Stress Amplitude

a. Safety Factor

Safety Factor	Safety Class		
	Low	Normal	High
η	1.0	0.5	0.25
γ_s	1.05 ¹⁾ (1.0)		
γ_f	1.20 ¹⁾ (1.15)		
γ_k	1.30		
γ_{on}	1.10		

b. Unit Stress Amplitude

$$A_{IL/CF} = C_4 (1 + CSF) \frac{D \cdot (D_s - t) \cdot E}{L_{eff}^2}$$

Tabel H.2 Perhitungan Unit Stress Amplitude

Cross Flow			In-Line		
L aktual	L efektif	ACF	L aktual	L kritis	AIL
5.381	9.734	6.57E+09	5.381	9.368	7.09E+09
2.879	12.762	3.82E+09	2.879	12.153	4.21E+09
12.869	5.378	2.15E+10	12.869	5.270	2.24E+10
3.606	11.713	4.53E+09	3.606	11.206	4.95E+09
19.147	3.625	4.73E+10	19.147	3.559	4.91E+10
6.882	8.474	8.66E+09	6.882	8.243	9.15E+09
6.978	8.398	8.82E+09	6.978	8.159	9.34E+09
7.440	8.174	9.31E+09	7.440	7.951	9.84E+09
16.078	4.328	3.32E+10	16.078	4.248	3.45E+10
4.386	10.748	5.38E+09	4.386	10.316	5.84E+09

Tabel H.2 Perhitungan Unit Stress Amplitude (lanjutan)

Cross Flow			In-Line		
L aktual	L efektif	ACF	L aktual	L kritis	AIL
7.684	7.872	1.00E+10	7.684	7.661	1.06E+10
12.108	5.574	2.00E+10	12.108	5.459	2.09E+10
11.893	5.658	1.94E+10	11.893	5.540	2.03E+10
11.385	5.957	1.75E+10	11.385	5.830	1.83E+10
10.630	6.294	1.57E+10	10.630	6.155	1.64E+10
10.406	6.300	1.57E+10	10.406	6.159	1.64E+10
15.544	4.540	3.02E+10	15.544	4.455	3.13E+10
6.727	8.600	8.41E+09	6.727	8.346	8.93E+09
12.651	5.201	2.30E+10	12.651	5.096	2.40E+10
8.628	6.604	1.43E+10	8.628	6.440	1.50E+10

H.2 Stress Range

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_Z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s \quad S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_Y/D) \cdot \psi_{\alpha,IL} \cdot \gamma_s$$

Tabel H.3 Perhitungan Stress Range (In-line)

In-Line							
L aktual	L efektif	AIL	Ay/D	α	Ψ	SIL	SIL (Mpa)
5.38145	9.368	7.09E+09	0.0019	0,998	1	3.46E+07	34.55
2.87924	12.153	4.21E+09	0.0019	0,998	1	2.05E+07	20.53
12.869	5.270	2.24E+10	0.0016	0,998	1	9.42E+07	94.23
3.60555	11.206	4.95E+09	0.0019	0,998	1	2.41E+07	24.15
19.1471	3.559	4.91E+10	0.0015	0,998	1	1.91E+08	191.49
6.88186	8.243	9.15E+09	0.0019	0,998	1	4.46E+07	44.62
6.97782	8.159	9.34E+09	0.0019	0,998	1	4.56E+07	45.56
7.44043	7.951	9.84E+09	0.0016	0,998	1	4.14E+07	41.40
16.0776	4.248	3.45E+10	0.0019	0,998	1	1.68E+08	168.02
4.38634	10.316	5.84E+09	0.0019	0,998	1	2.85E+07	28.49
7.68375	7.661	1.06E+10	0.0019	0,998	1	5.17E+07	51.66
12.1083	5.459	2.09E+10	0.0019	0,994	1	1.02E+08	101.76
11.8929	5.540	2.03E+10	0.0019	0,998	1	9.88E+07	98.80
11.3846	5.830	1.83E+10	0.0016	0,998	1	7.70E+07	76.99
10.6301	6.155	1.64E+10	0.0016	0,998	1	6.91E+07	69.09
10.4062	6.159	1.64E+10	0.0019	0,998	1	7.99E+07	79.94
15.5438	4.455	3.13E+10	0.0023	0,998	1	1.86E+08	186.10
6.72681	8.346	8.93E+09	0.0019	0,998	1	4.35E+07	43.53
12.6507	5.096	2.40E+10	0.0019	0,998	1	1.20E+08	119.74
8.62786	6.440	1.50E+10	0.0013	0,998	1	5.23E+07	52.31

Tabel H.4 Perhitungan Stress Range (*Cross-flow*)

Cross Flow							
L aktual	L efektif	ACF	Az/D	Ksd	Rk	SCF	SCF (Mpa)
5.38145	9.734	6.57E+09	0.0010	0,728	0,891	1.52E+07	15.21
2.87924	12.762	3.82E+09	0.0010	0,728	0,891	8.85E+06	8.85
12.869	5.378	2.15E+10	0.0010	0,713	0,893	4.99E+07	49.94
3.60555	11.713	4.53E+09	0.0010	0,728	0,891	1.05E+07	10.50
19.1471	3.625	4.73E+10	0.0010	0,728	0,891	1.10E+08	109.64
6.88186	8.474	8.66E+09	0.0010	0,728	0,891	2.01E+07	20.06
6.97782	8.398	8.82E+09	0.0010	0,728	0,891	2.04E+07	20.43
7.44043	8.174	9.31E+09	0.0010	0,713	0,893	2.16E+07	21.62
16.0776	4.328	3.32E+10	0.0010	0,728	0,891	7.69E+07	76.91
4.38634	10.748	5.38E+09	0.0010	0,728	0,891	1.25E+07	12.47
7.68375	7.872	1.00E+10	0.0010	0,728	0,891	2.33E+07	23.25
12.1083	5.574	2.00E+10	0.0010	0,728	0,891	4.64E+07	46.37
11.8929	5.658	1.94E+10	0.0010	0,728	0,891	4.50E+07	45.01
11.3846	5.957	1.75E+10	0.0010	0,713	0,893	4.07E+07	40.70
10.6301	6.294	1.57E+10	0.0010	0,713	0,893	3.65E+07	36.47
10.4062	6.300	1.57E+10	0.0010	0,728	0,891	3.63E+07	36.30
15.5438	4.540	3.02E+10	0.0010	0,713	0,893	7.01E+07	70.07
6.72681	8.600	8.41E+09	0.0010	0,728	0,891	1.95E+07	19.48
12.6507	5.201	2.30E+10	0.0010	0,760	0,886	5.30E+07	52.97
8.62786	6.604	1.43E+10	0.0010	0,825	0,876	3.25E+07	32.49

LAMPIRAN I

PERHITUNGAN *FATIGUE LIFE*

LAMPIRAN I

I.1 Menentukan Nilai Siklus (n_i) VIV pada Pipa

1. Perhitungan Frekuensi *vortex Shedding*

$$S_t = \left(\frac{0.2}{(C_D)^{3/4}} \right) = 0.192$$

$$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right) = 0.208 \text{ Hz}$$

2. Akumulasi Siklus VIV pada Pipa

$$n_i = f_s (P_i)$$

Tabel I.1 Frekuensi *Vortex Shedding* (in-line)

Panjang Span	Tegangan	Strouhal Number	Frekuensi Vortex Shedding	Jumlah Siklus (n_i)
	MPa		10 Tahun	10 Tahun
5.38	18.43	0.202	0.204	1.43×10^4
2.88	10.95	0.202	0.204	1.43×10^4
12.87	58.23	0.205	0.213	1.49×10^4
3.61	12.88	0.202	0.204	1.43×10^4
19.15	127.66	0.199	0.202	1.42×10^4
6.88	23.80	0.202	0.204	1.43×10^4
6.98	24.30	0.202	0.204	1.43×10^4
7.44	25.58	0.205	0.213	1.49×10^4
16.08	89.61	0.202	0.204	1.43×10^4
4.39	15.20	0.202	0.204	1.43×10^4
7.68	27.55	0.202	0.204	1.43×10^4
12.11	54.27	0.202	0.205	1.44×10^4
11.89	52.70	0.202	0.204	1.43×10^4
11.38	47.58	0.205	0.213	1.49×10^4
10.63	42.70	0.205	0.213	1.49×10^4
10.41	42.63	0.202	0.204	1.43×10^4
15.54	81.47	0.205	0.217	1.53×10^4
6.73	23.22	0.202	0.204	1.43×10^4
12.65	62.27	0.196	0.194	1.36×10^4
8.63	39.00	0.185	0.179	1.26×10^4

Tabel I.2 Frekuensi *Vortex Shedding* (cross-flow)

Panjang Span	Tegangan	Strouhal Number	Frekuensi Vortex Shedding	Jumlah Siklus (n_i)
	MPa		10 Tahun	10 Tahun
5.38	28.51	0.1921	0.397	2.79×10^4
2.88	16.59	0.1921	0.397	2.79×10^4
12.87	80.81	0.1948	0.413	2.90×10^4
3.61	19.69	0.1921	0.397	2.79×10^4
19.15	164.46	0.1900	0.392	2.75×10^4
6.88	37.62	0.1921	0.397	2.79×10^4
6.98	38.31	0.1921	0.397	2.79×10^4
7.44	34.98	0.1948	0.413	2.79×10^4
16.08	144.20	0.1921	0.397	2.79×10^4
4.39	23.38	0.1921	0.397	2.90×10^4
7.68	43.59	0.1921	0.397	2.79×10^4
12.11	86.94	0.1921	0.397	2.75×10^4
11.89	84.39	0.1921	0.397	2.79×10^4
11.38	65.86	0.1948	0.413	2.79×10^4
10.63	59.01	0.1948	0.413	2.90×10^4
10.41	68.06	0.1921	0.397	2.79×10^4
15.54	160.06	0.1948	0.421	2.95×10^4
6.73	36.53	0.1921	0.397	2.79×10^4
12.65	101.84	0.1867	0.379	2.66×10^4
8.63	43.58	0.1765	0.351	2.46×10^4

I.2 Menentukan Nilai Siklus Tegangan (N_i) VIV pada Pipa

Tabel I.5 Parameter nilai Siklus Tegangan (DNV RP C 203)

Parameter	Notasi	Nilai
Eksponen S-N Curve	m	3
S-N Curve Jenis Pipa	-	D
Log A	-	11,764
A	-	5.1×10^{10}

Perhitungan nilai siklus tegangan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 N_i &= A \cdot S_i^{-m} \\
 &= 5.1 \times 10^{10} \cdot S_i^{-3}
 \end{aligned}$$

Tabel I.5 Perhitungan nilai Siklus Tegangan (*In-line*)

Panjang Span	Tegangan	Jumlah Siklus (n_i)	A	m	Siklus Kegagalan Tegangan (N_i)
	Mpa	10 Tahun	Log A		
5.38	34.55	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	1.23×10^6
2.88	20.53	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.86×10^6
12.87	94.23	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	6.07×10^4
3.61	24.15	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	3.61×10^6
19.15	191.49	1.42×10^4	5.07×10^{10}	3	7.23×10^3
6.88	44.62	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.71×10^5
6.98	45.56	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.37×10^5
7.44	41.40	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	7.15×10^5
16.08	168.02	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	1.07×10^4
4.39	28.49	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	2.19×10^6
7.68	51.66	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	3.68×10^5
12.11	101.76	1.44×10^4	5.07×10^{10}	3	4.82×10^4
11.89	98.80	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	5.26×10^4
11.38	76.99	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	1.11×10^5
10.63	69.09	1.49×10^4	5.07×10^{10}	3	1.54×10^5
10.41	79.94	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	9.94×10^4
15.54	186.10	1.53×10^4	5.07×10^{10}	3	7.88×10^3
6.73	43.53	1.43×10^4	5.07×10^{10}	3	6.15×10^5
12.65	119.74	1.36×10^4	5.07×10^{10}	3	2.96×10^4
8.63	52.31	1.26×10^4	5.07×10^{10}	3	3.55×10^5

Tabel I.5 Perhitungan nilai Siklus Tegangan (*cross-flow*)

Panjang Span	Tegangan	Jumlah Siklus (n_i)	A	m	Siklus Kegagalan Tegangan (N_i)
	Mpa	10 Tahun	Log A		
16.08	15.21	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	1.44×10^7
4.39	8.85	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	7.33×10^7
7.68	49.94	2.90×10^4	5.07×10^{10}	3	4.08×10^5
12.11	10.50	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	4.38×10^7
11.89	109.64	2.75×10^4	5.07×10^{10}	3	3.85×10^4
11.38	20.06	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	6.29×10^6
10.63	20.43	2.79×10^4	5.07×10^{10}	3	5.95×10^6

Tabel I.5 Perhitungan nilai Siklus Tegangan (*cross-flow*) lanjutan

Panjang Span	Tegangan	Jumlah Siklus (n _i)	A	m	Siklus Kegagalan Tegangan (N _i)
	Mpa	10 Tahun	Log A		
16.08	76.91	2.79 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	1.12 x 10 ⁵
4.39	12.47	2.79 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	2.62 x 10 ⁷
7.68	23.25	2.79 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	4.04 x 10 ⁶
12.11	46.37	2.79 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	5.09 x 10 ⁵
11.89	45.01	2.79 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	5.57 x 10 ⁵
11.38	40.70	2.90 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	7.53 x 10 ⁵
10.63	36.47	2.90 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	1.05 x 10 ⁶
10.41	36.30	2.79 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	1.06 x 10 ⁶
15.54	70.07	2.95 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	1.48 x 10 ⁵
6.73	19.48	2.79 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	6.87 x 10 ⁶
12.65	52.97	2.66 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	3.42 x 10 ⁵
8.63	32.49	2.46 x 10 ⁴	5.07 x 10 ¹⁰	3	1.48 x 10 ⁶

I.3 Menentukan Nilai *Fatigue Damage*

- a. *Fatigue Damage* (DNV RP C-203)

$$D_{exposure} = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

- b. *Fatigue Damage* (DNV GL RP F-105)

$$D_{fat,RP F 105} = \sum \frac{D_{exposure}}{\eta}$$

- c. *Fatigue Damage* (DNV ST F101)

$$D_{fat,ST F 101} = \sum \frac{n_i}{N_i} + \frac{D_{fat,RP F 105}}{DFF}$$

I.4 Menentukan *Fatigue Life*

$$T_{life} = \sum \frac{T_{exposure} \cdot \eta}{D_{fat}}$$

Tabel I.6 Perhitungan nilai *fatigue damage* dan *fatigue life* (In-line)

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Cek Kegagalan</i>
	DNV GL RP F 105	Tahun	DNV OS F101	Tahun	
5.38	0.029	171.9	0.0165	1213.54	TIDAK GAGAL
2.88	0.006	819.2	0.0035	5782.35	TIDAK GAGAL
12.87	0.616	8.1	0.3489	57.32	TIDAK GAGAL
3.61	0.010	503.6	0.0056	3554.55	TIDAK GAGAL
19.15	4.896	1.0	2.7744	7.21	GAGAL
6.88	0.063	79.8	0.0355	563.27	TIDAK GAGAL
6.98	0.067	75.0	0.0378	529.42	TIDAK GAGAL
7.44	0.052	95.8	0.0296	675.92	TIDAK GAGAL
16.08	3.345	1.5	1.8955	10.55	GAGAL
4.39	0.016	306.6	0.0092	2163.88	TIDAK GAGAL
7.68	0.097	51.4	0.0551	362.99	TIDAK GAGAL
12.11	0.748	6.7	0.4237	47.20	TIDAK GAGAL
11.89	0.680	7.4	0.3854	51.89	TIDAK GAGAL
11.38	0.336	14.9	0.1903	105.09	TIDAK GAGAL
10.63	0.243	20.6	0.1375	145.41	TIDAK GAGAL
10.41	0.360	13.9	0.2041	97.99	TIDAK GAGAL
15.54	4.844	1.0	2.7450	7.29	GAGAL
6.73	0.058	85.9	0.0330	606.65	TIDAK GAGAL
12.65	1.154	4.3	0.6539	30.59	TIDAK GAGAL
8.63	0.089	56.3	0.0503	397.68	TIDAK GAGAL

Tabel I.6 Perhitungan nilai *fatigue damage* dan *fatigue life* (Cross-flow)

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Cek Kegagalan</i>
	DNV GL RP F 105	Tahun	DNV OS F101	Tahun	
5.38	0.005	1036.7	0.0027	7317.91	TIDAK GAGAL
2.88	0.001	5266.0	0.0005	37171.42	TIDAK GAGAL
12.87	0.178	28.1	0.1007	198.65	TIDAK GAGAL
3.61	0.002	3148.0	0.0009	22220.89	TIDAK GAGAL

Tabel I.6 Perhitungan nilai *fatigue damage* dan *fatigue life* (Cross-flow)

lanjutan

Panjang Span	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Fatigue Damage</i>	<i>Fatigue Life</i>	<i>Cek Kegagalan</i>
	DNV GL RP F 105	Tahun	DNV OS F101	Tahun	
19.15	1.788	2.8	1.0131	19.74	GAGAL
6.88	0.011	451.3	0.0063	3185.78	TIDAK GAGAL
6.98	0.012	427.5	0.0066	3017.53	TIDAK GAGAL
7.44	0.014	346.9	0.0082	2448.50	TIDAK GAGAL
16.08	0.624	8.0	0.3536	56.56	TIDAK GAGAL
4.39	0.003	1879.4	0.0015	13266.37	TIDAK GAGAL
7.68	0.017	290.0	0.0098	2047.09	TIDAK GAGAL
12.11	0.137	36.6	0.0775	258.06	TIDAK GAGAL
11.89	0.125	40.0	0.0709	282.23	TIDAK GAGAL
11.38	0.096	52.0	0.0545	366.92	TIDAK GAGAL
10.63	0.066	76.2	0.0372	537.89	TIDAK GAGAL
10.41	0.500	10.0	0.2835	70.56	TIDAK GAGAL
15.54	0.010	493.1	0.0057	3480.41	TIDAK GAGAL
6.73	0.195	25.7	0.1103	181.26	TIDAK GAGAL
12.65	0.042	120.2	0.0236	848.39	TIDAK GAGAL
8.63	0.066	76.2	0.0372	537.89	TIDAK GAGAL

LAMPIRAN J
PERHITUNGAN *VON MISES STRESS*

LAMPIRAN J

J.1 Tegangan *Hoop*

1. Perhitungan Tegangan *Hoop*

$$\sigma_h = \begin{cases} (p_i - p_e) \frac{D_0}{2t} & \text{untuk } \frac{D}{t} \geq 30 \\ (p_i - p_e) \frac{D_0 - t}{2t} & \text{untuk } \frac{D}{t} < 30 \end{cases}$$

Tabel J.1 Parameter Perhitungan *Hoop Stress*

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter luar pipa baja	D ₀	0.3556	m
Tebal nominal dinding pipa	t _{nom}	0.0143	m
<i>Mill Tolerance</i>	t _{mill}	0.00179	m
Tebal dinding pipa	t	0.0095	m
Tekanan eksternal	P _e	5.14 x 10 ⁵	Pa
Tekanan internal	P _i	9.9 x 10 ⁶	Pa
Rasio ukuran pipa	D/t	37	-

Tabel J.2 Perhitungan *Hoop Stress*

TEGANGAN HOOP			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tegangan hoop	σ _h	116378746.49	Pa
		116.38	MPa

Tabel J.3 Cek ASME B31.8

CEK ASME B31.8			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tegangan hoop	σ _h	116.38	MPa
<i>Specified minimum yield strength</i>	SMYS	360.00	MPa
	σ _h	0.72 SMYS	Rasio
	116.38	259.20	0.45
OK			

J.2 Tegangan *Longitudinal*

1. Perhitungan Tegangan *Longitudinal*

$$\sigma_L = \sigma_a + \sigma_b \text{ atau } \sigma_a - \sigma_b$$

Dimana,

σ_L = tegangan *longitudinal* (MPa)

σ_a = tekanan aksial kombinasi (MPa)

σ_b = tekanan bending (MPa)

2. Tegangan Aksial Kombinasi

$$F_r = (F_p + W_{sub})^{1/2}$$

Tabel J.4 Parameter Tegangan Aksial

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Tebal dinding pipa	t	0.0095125	m
Diameter luar pipa baja	D ₀	0.3556	m
Diameter dalam pipa	D _i	0.337	m
Luas penampang pipa	A _{st}	0.010	m
Tekanan internal	P _i	9930178	Pa
Gaya tekanan internal	F _p	102704.03	N
Berat terendam pipa	W _{sub}	1545.20	N/m

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} + v_{st}\sigma_h + E_{st}\alpha_e(T_1 - T_2)$$

TEGANGAN <i>THERMAL</i>					
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Tegangan <i>thermal</i>	σ_t	-96876000.00	Pa	-96.88	MPa
TEGANGAN <i>POISSON</i>					
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Tegangan <i>poisson</i>	σ_{ps}	34913623.95	Pa	34.91	MPa
TEGANGAN <i>AKSIAL KOMBINASI</i>					
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan		
Tegangan aksial kombinasi	σ_a	-52.03	MPa		

3. Tegangan Bending

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{z_a}$$

Tabel J.5 Perhitungan Tegangan *Bending*

TEGANGAN <i>BENDING</i>						
Panjang Bentangan Bebas Aktual	Gaya Drag	Momen Maksimum (fixed-fixed)			Tegangan <i>Bending</i>	
		M. Vertikal	M. Horizontal	Resultan		
m	N/m	N.m	N.m	N.m	Pa	MPa
5.381	238.341	3729.093	575.196	3773.19	4329128.491	4.329
2.879	238.341	1067.479	164.654	1080.1	1239242.928	1.239
12.869	250.737	21325.105	3460.381	21604	24787137.057	24.787
3.606	238.341	1673.971	258.203	1693.77	1943324.253	1.943
19.147	238.341	47207.275	7281.516	47765.5	54803238.810	54.803
6.882	238.341	6098.406	940.652	6170.53	7079679.741	7.080
6.978	238.341	6269.666	967.069	6343.81	7278496.761	7.278
7.440	250.737	7128.542	1156.734	7221.78	8285827.592	8.286
16.078	238.341	33284.986	5134.064	33678.6	38640760.481	38.641
4.386	238.361	2477.477	382.173	2506.78	2876125.641	2.876
7.684	238.341	7602.405	1172.638	7692.31	8825681.840	8.826
12.108	238.341	18878.532	2911.931	19101.8	21916212.984	21.916
11.893	238.341	18212.807	2809.246	18428.2	21143367.877	21.143
11.385	250.737	16689.493	2708.169	16907.8	19398954.374	19.399
10.630	250.737	14550.673	2361.107	14741	16912906.753	16.913
10.406	238.341	13944.180	2150.829	14109.1	16187891.031	16.188
15.544	260.322	31111.398	5241.371	31549.8	36198315.230	36.198
6.727	238.341	5826.707	898.744	5895.61	6764263.267	6.764
12.651	230.446	20607.873	3073.376	20835.8	23905697.503	23.906
8.628	220.666	9585.417	1368.866	9682.67	11109292.477	11.109

Tabel J.6 Perhitungan Tegangan Longitudinal

TEGANGAN LONGITUDINAL							
Panjang Bentangan Bebas Aktual	TEGANGAN				Longitudinal maksimum	0.8 SMYS	RASIO
	<i>Aksial Kombinasi</i>	<i>Bending</i>	Longitudinal				
m	MPa	MPa	MPa	MPa	Mpa	MPa	
5.381	-52.03	4.33	-47.70	-56.36	-56.36	288.00	0.20
2.879	-52.03	1.24	-50.79	-53.27	-53.27	288.00	0.18
12.869	-52.03	24.79	-27.24	-76.82	-76.82	288.00	0.27
3.606	-52.03	1.94	-50.09	-53.97	-53.97	288.00	0.19
19.147	-52.03	54.80	2.77	-106.83	-106.83	288.00	0.37
6.882	-52.03	7.08	-44.95	-59.11	-59.11	288.00	0.21
6.978	-52.03	7.28	-44.75	-59.31	-59.31	288.00	0.21
7.440	-52.03	8.29	-43.75	-60.32	-60.32	288.00	0.21
16.078	-52.03	38.64	-13.39	-90.67	-90.67	288.00	0.31
4.386	-52.03	2.88	-49.15	-54.91	-54.91	288.00	0.19
7.684	-52.03	8.83	-43.21	-60.86	-60.86	288.00	0.21
12.108	-52.03	21.92	-30.11	-73.95	-73.95	288.00	0.26
11.893	-52.03	21.14	-30.89	-73.17	-73.17	288.00	0.25
11.385	-52.03	19.40	-32.63	-71.43	-71.43	288.00	0.25
10.630	-52.03	16.91	-35.12	-68.94	-68.94	288.00	0.24
10.406	-52.03	16.19	-35.84	-68.22	-68.22	288.00	0.24
15.544	-52.03	36.20	-15.83	-88.23	-88.23	288.00	0.31
6.727	-52.03	6.76	-45.27	-58.80	-58.80	288.00	0.20
12.651	-52.03	23.91	-28.13	-75.94	-75.94	288.00	0.26
8.628	-52.03	11.11	-40.92	-63.14	-63.14	288.00	0.22

J.3 Tegangan *Von Mises* (Ekivalen)

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2}$$

Tabel J.7 Perhitungan Tegangan Ekivalen (Von Mises)

Panjang Bentangan Bebas	TEGANGAN			0.9 SMYS	Cek ASME B31.8	RASIO
	<i>Hoop</i>	Longitudinal	<i>Von Mises</i>			
m	MPa	Mpa	MPa			MPa
5.381	116.38	-56.36	152.58	324.00	ALLOWABLE	0.47
2.879	116.38	-53.27	150.27	324.00	ALLOWABLE	0.46
12.869	116.38	-76.82	168.48	324.00	ALLOWABLE	0.52
3.606	116.38	-53.97	150.79	324.00	ALLOWABLE	0.47
19.147	116.38	-106.83	193.37	324.00	ALLOWABLE	0.60
6.882	116.38	-59.11	154.65	324.00	ALLOWABLE	0.48
6.978	116.38	-59.31	154.80	324.00	ALLOWABLE	0.48
7.440	116.38	-60.32	155.57	324.00	ALLOWABLE	0.48
16.078	116.38	-90.67	179.77	324.00	ALLOWABLE	0.55
4.386	116.38	-54.91	151.49	324.00	ALLOWABLE	0.47
7.684	116.38	-60.86	155.98	324.00	ALLOWABLE	0.48
12.108	116.38	-73.95	166.19	324.00	ALLOWABLE	0.51
11.893	116.38	-73.17	165.57	324.00	ALLOWABLE	0.51
11.385	116.38	-71.43	164.19	324.00	ALLOWABLE	0.51
10.630	116.38	-68.94	162.24	324.00	ALLOWABLE	0.50
10.406	116.38	-68.22	161.67	324.00	ALLOWABLE	0.50
15.544	116.38	-88.23	177.75	324.00	ALLOWABLE	0.55
6.727	116.38	-58.80	154.41	324.00	ALLOWABLE	0.48
12.651	116.38	-75.94	167.77	324.00	ALLOWABLE	0.52
8.628	116.38	-63.14	157.73	324.00	ALLOWABLE	0.49

LAMPIRAN K

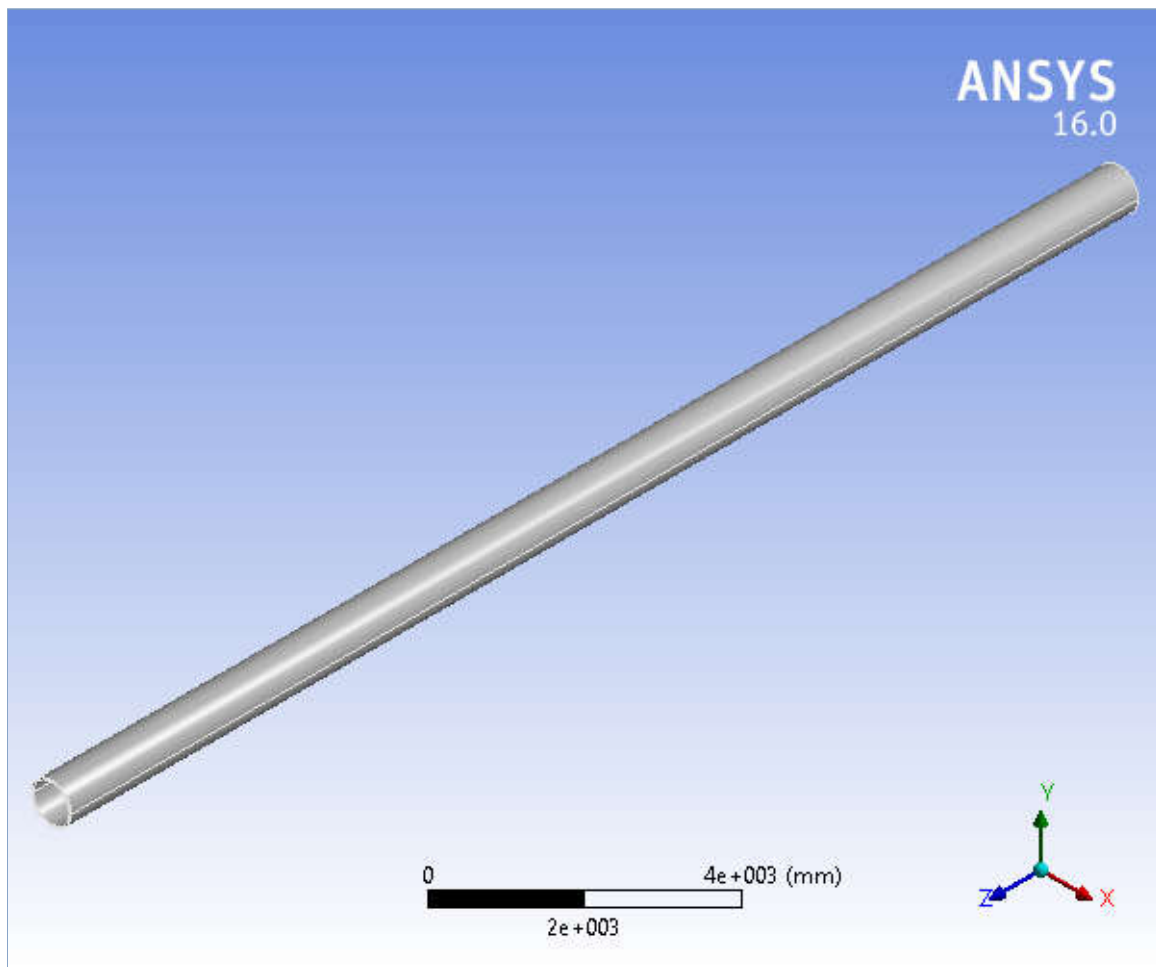
ANSYS CFX dan ANSYS STATIC

STRUCTURAL



Project

First Saved	Thursday, January 3, 2019
Last Saved	Friday, January 4, 2019
Product Version	16.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- [Units](#)
- [Model \(B4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Solid](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Mesh](#)
 - [Static Structural \(B5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Solution \(B6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Equivalent Stress](#)
- [Material Data](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (mm, t, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (B4)

Geometry

TABLE 2
Model (B4) > Geometry

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\riko (please dont touch)\roni titip\model p3 backup_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	711.2 mm
Length Y	711.2 mm
Length Z	19150 mm
Properties	
Volume	1.1744e+009 mm ³
Mass	9.2188 t
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	28862
Elements	4140
Mesh Metric	None

Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\pcaaa\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (B4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Solid</i>
State	Meshed
Graphics Properties	
Visible	Yes
Transparency	1
Definition	
Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment
Material	
Assignment	Structural Steel
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes
Bounding Box	
Length X	711.2 mm
Length Y	711.2 mm
Length Z	19150 mm
Properties	
Volume	1.1744e+009 mm ³
Mass	9.2188 t
Centroid X	8.7495e-012 mm
Centroid Y	8.4855e-002 mm
Centroid Z	9575. mm
Moment of Inertia Ip1	2.8094e+008 t·mm ²
Moment of Inertia Ip2	2.8094e+008 t·mm ²
Moment of Inertia Ip3	1.0655e+006 t·mm ²
Statistics	
Nodes	28862
Elements	4140
Mesh Metric	None

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
-------------	---------------------------------

State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0.
Origin	
Origin X	0. mm
Origin Y	0. mm
Origin Z	0. mm
Directional Vectors	
X Axis Data	[1. 0. 0.]
Y Axis Data	[0. 1. 0.]
Z Axis Data	[0. 0. 1.]

Mesh

TABLE 5
Model (B4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
Minimum Edge Length	1027.30 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On

Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	28862
Elements	4140
Mesh Metric	None

Static Structural (B5)

TABLE 6
Model (B4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (B5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	22. °C
Generate Input Only	No

TABLE 7
Model (B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\riko (please dont touch)\roni titip\model p3 backup_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No

Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mm

TABLE 8
Model (B4) > Static Structural (B5) > Loads

Object Name	Vortex Pressure	Fixed Support 2	Drag Force	Submerged Weight Force	Internal Pressure	External Pressure	Lift Force	Moment	Effective Axial Force
State	Fully Defined								
Scope									
Scoping Method	Geometry Selection								
Geometry	2 Faces	1 Face	2 Faces						4 Faces
Definition									
Type	Pressure	Fixed Support	Force		Pressure		Force	Moment	Force
Define By	Normal To		Vector		Normal To		Vector		
Magnitude	3.e-005 MPa (ramped)		4563.5 N (ramped)	29591 N (ramped)	9.93 MPa (ramped)	0.5 MPa (ramped)	3028.2 N (ramped)	20.09 N·mm (ramped)	1.8e+006 N (ramped)
Suppressed	No								
Direction			Defined				Defined		
Behavior								Deformable	
Advanced									
Pinball Region								All	

FIGURE 1
Model (B4) > Static Structural (B5) > Vortex Pressure

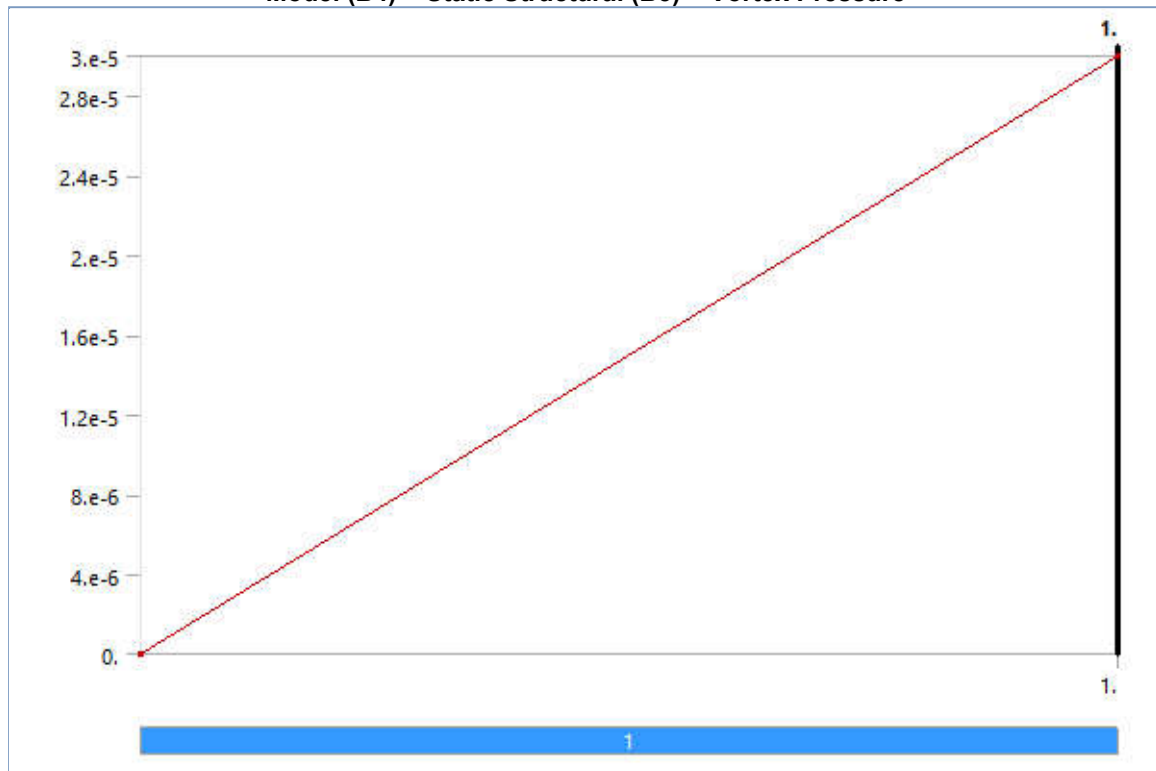


FIGURE 2
Model (B4) > Static Structural (B5) > Drag Force

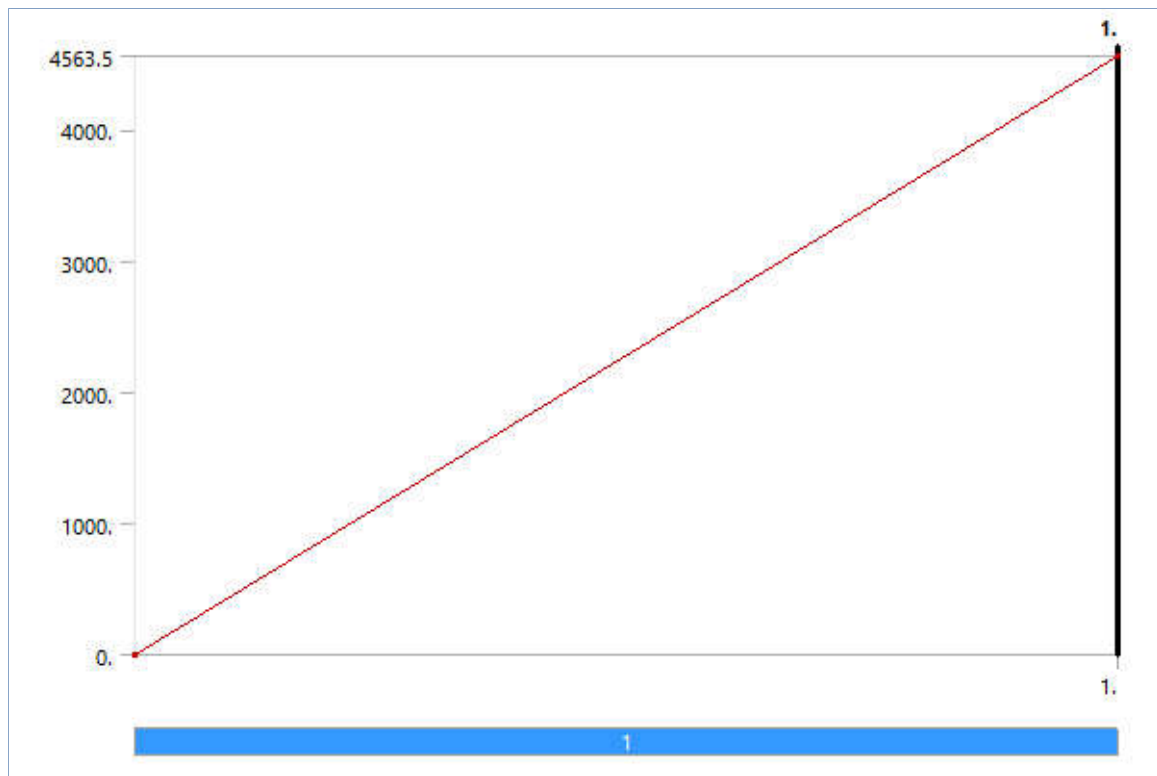


FIGURE 3
Model (B4) > Static Structural (B5) > Submerged Weight Force

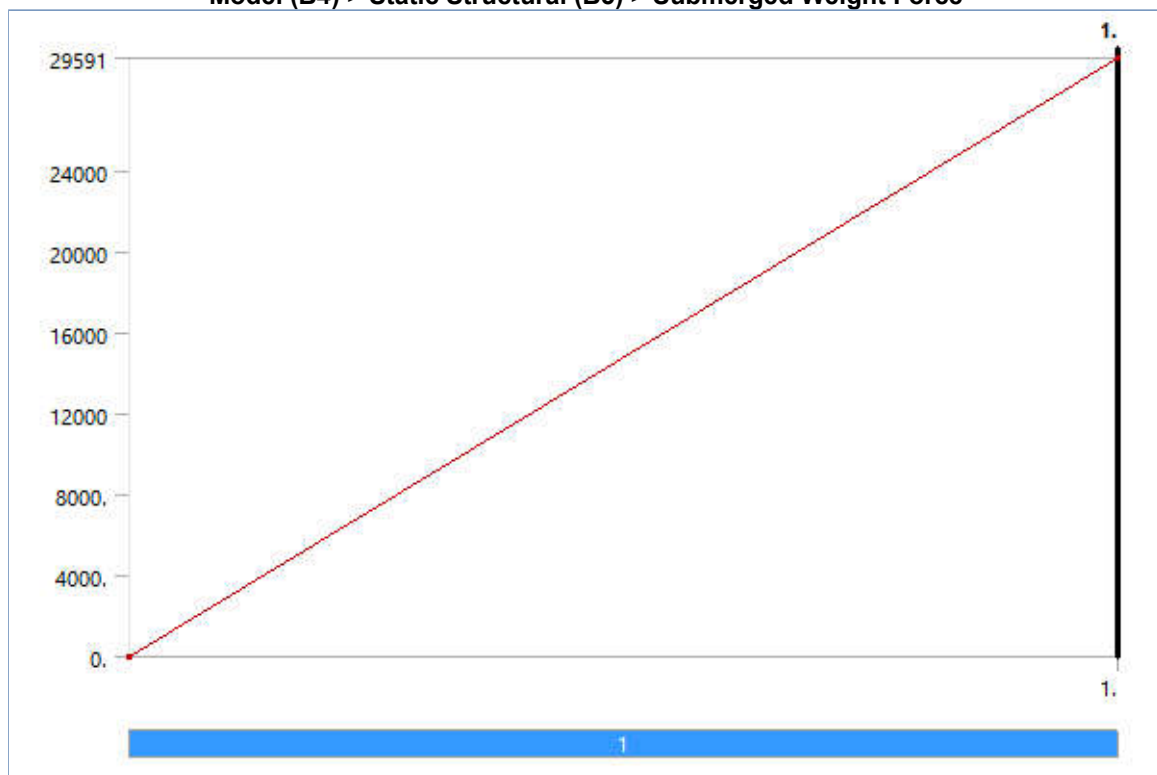


FIGURE 4
Model (B4) > Static Structural (B5) > Internal Pressure

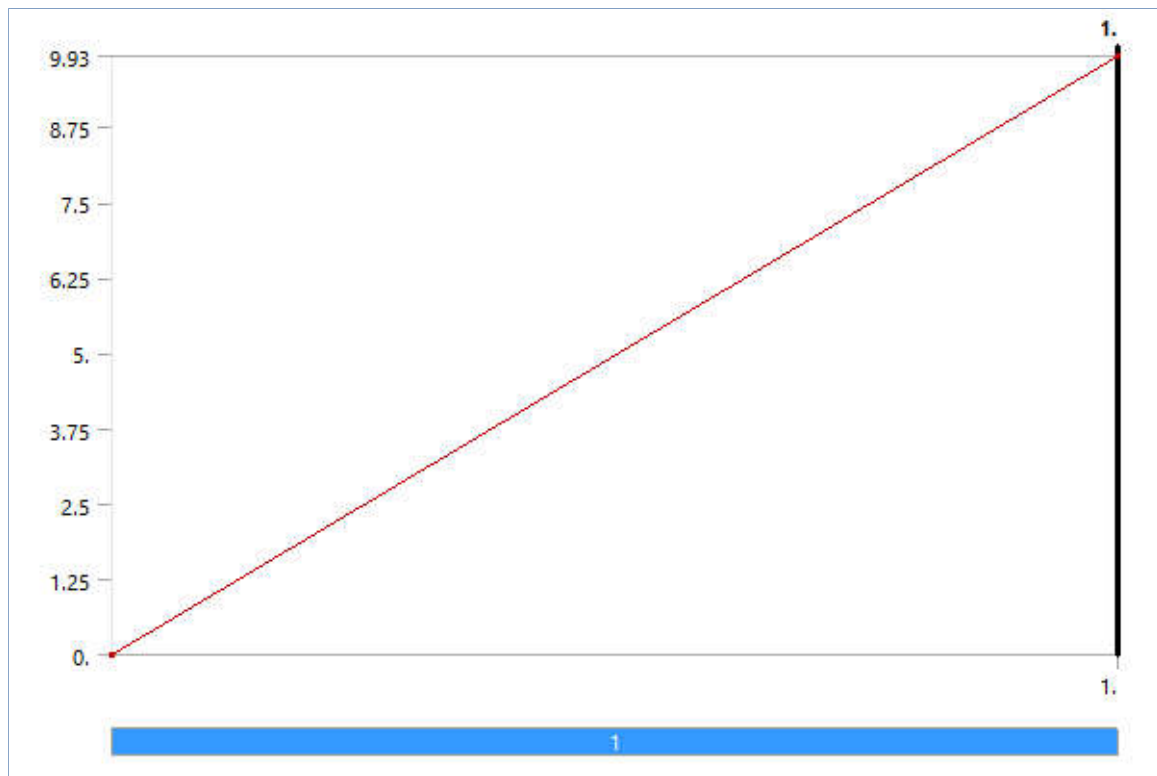


FIGURE 5
Model (B4) > Static Structural (B5) > External Pressure

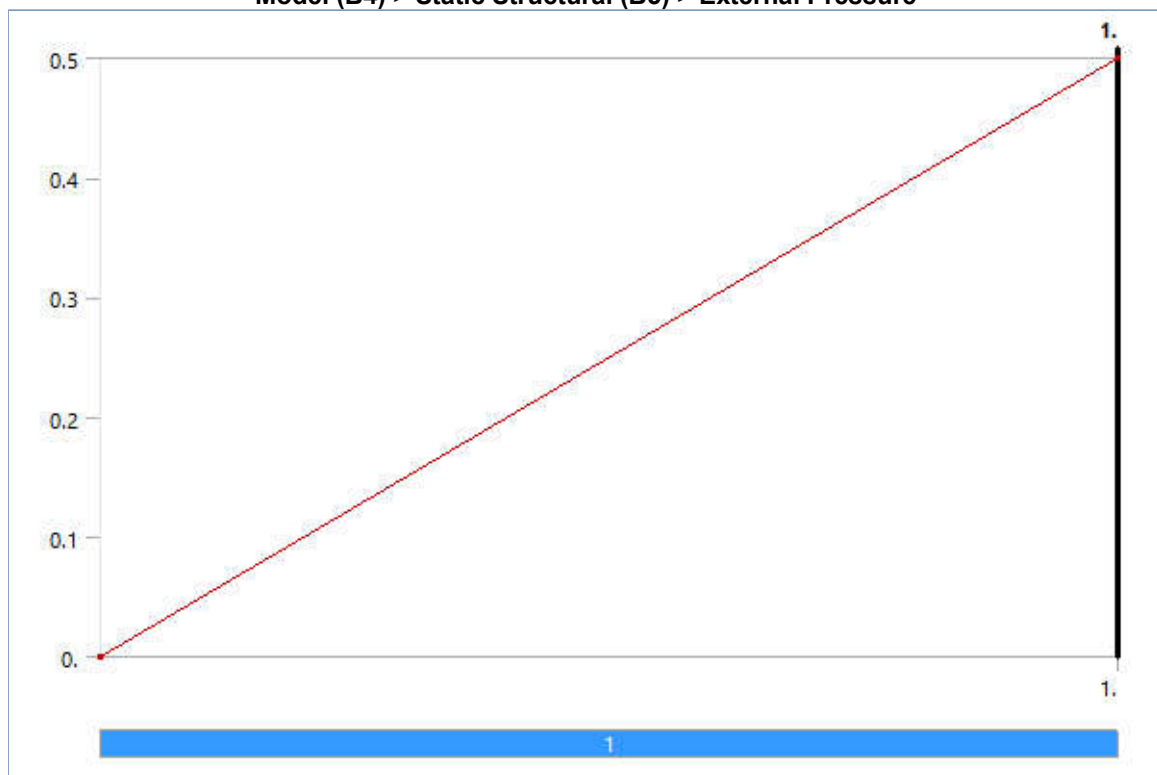


FIGURE 6
Model (B4) > Static Structural (B5) > Lift Force

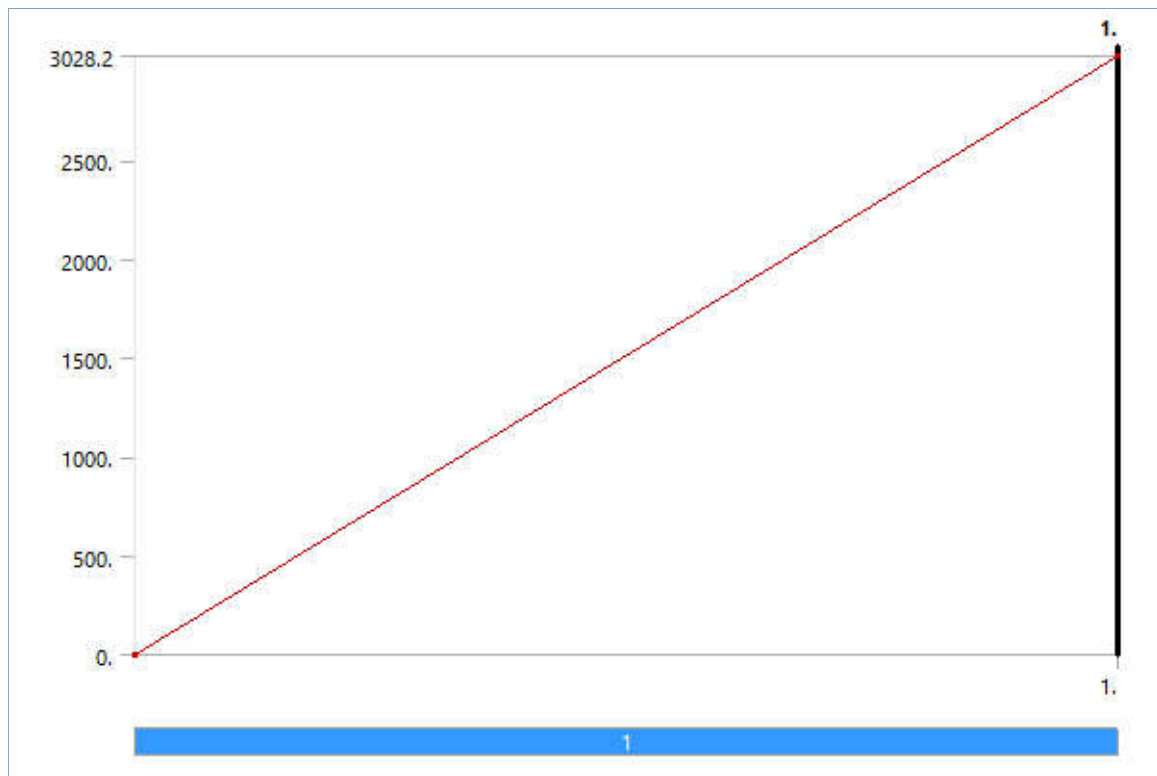


FIGURE 7
Model (B4) > Static Structural (B5) > Moment

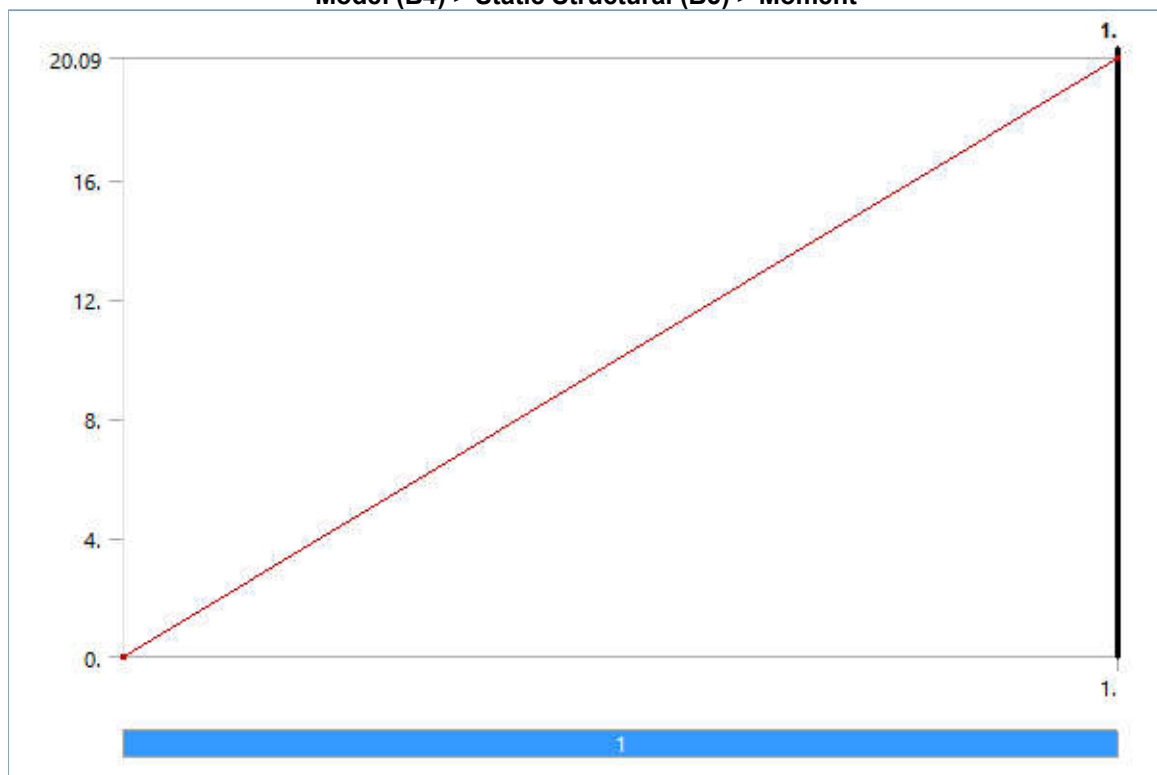
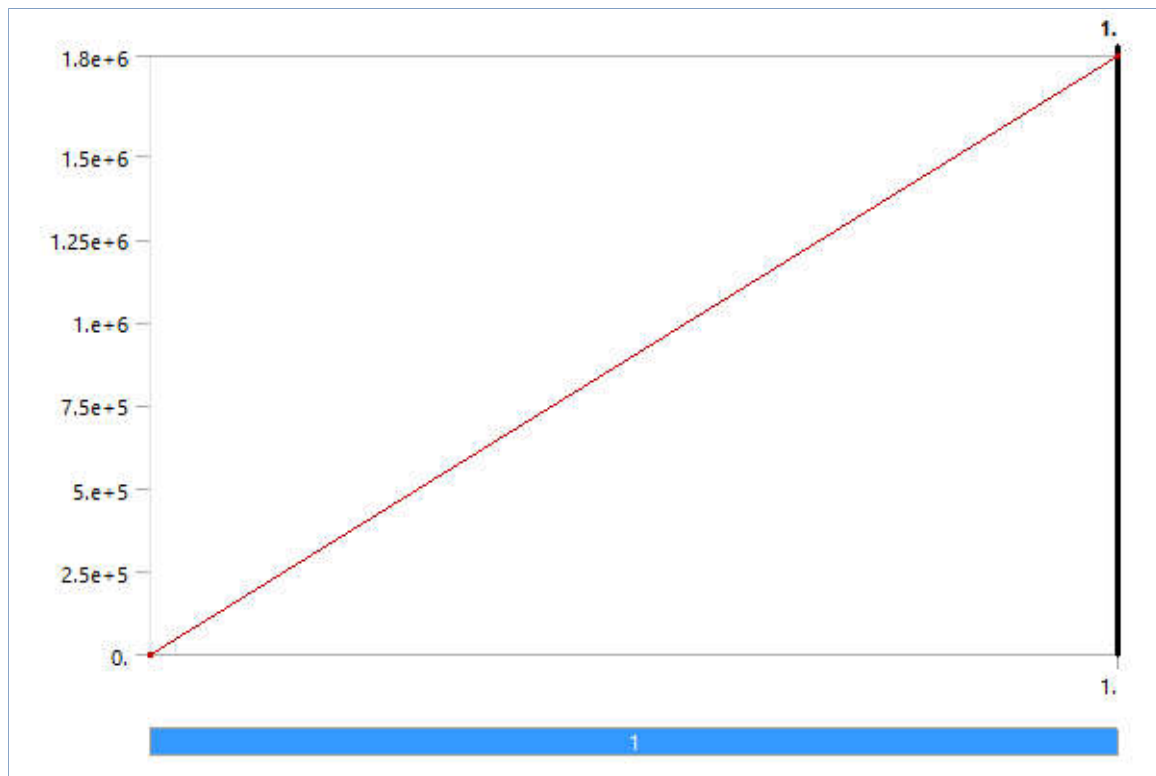


FIGURE 8
Model (B4) > Static Structural (B5) > Effective Axial Force



Solution (B6)

TABLE 9
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution

Object Name	<i>Solution (B6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1.
Refinement Depth	2.
Information	
Status	Done
Post Processing	
Calculate Beam Section Results	No

TABLE 10
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2.5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 11
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
Minimum	30.633 MPa
Maximum	193.49 MPa
Information	
Time	1. s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

FIGURE 9
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

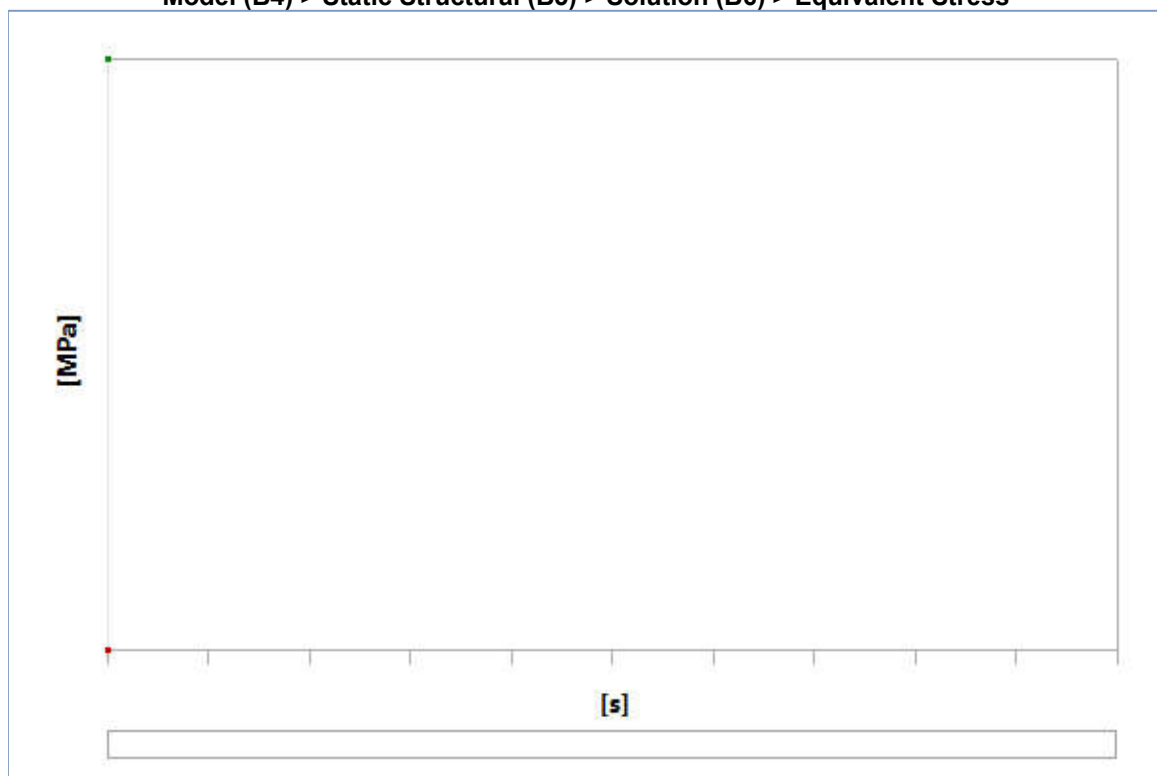


TABLE 12
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
1.	30.633	193.49

Material Data

Structural Steel

TABLE 13
Structural Steel > Constants

Density	7.85e-009 tonne mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C ⁻¹
Specific Heat	4.34e+008 mJ tonne ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	6.05e-002 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1.7e-004 ohm mm

TABLE 14
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength MPa
0

TABLE 15
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength MPa
250

TABLE 16
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength MPa
250

TABLE 17
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength MPa
460

TABLE 18
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22

TABLE 19
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999	10	0
2827	20	0
1896	50	0
1413	100	0
1069	200	0
441	2000	0
262	10000	0
214	20000	0
138	1.e+005	0
114	2.e+005	0
86.2	1.e+006	0

TABLE 20
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient MPa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient MPa	Cyclic Strain Hardening Exponent
920	-0.106	0.213	-0.47	1000	0.2

TABLE 21
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa
	2.e+005	0.3	1.6667e+005	76923

TABLE 22

Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

**Title**

Generic Report

Author

Ahmad Syahroni

Date

2019/01/02 11:47:33

Contents

1. [File Report](#)

[Table 1](#) File Information for CFX

2. [Mesh Report](#)

[Table 2](#) Mesh Information for CFX

[Table 3](#) Mesh Statistics for CFX

3. [Physics Report](#)

[Table 4](#) Domain Physics for CFX

[Table 5](#) Boundary Physics for CFX

4. [Pictures](#)

[Figure 1](#) Iso View of Wireframe

1. File Report

Table 1. File Information for CFX

Case	CFX
File Path	C:\Users\pcaaa\Downloads\ronie\DATA TA! DONT TOUCH!\pemodelan\model span 19m vortex_files\dp0\CFX\CFX\Fluid Flow CFX_001.res
File Date	20 November 2018
File Time	02:11:53 PM
File Type	CFX5
File Version	16.0

2. Mesh Report

Table 2. Mesh Information for CFX

Domain	Nodes	Elements	Tetrahedra	Wedges	Pyramids	Hexahedra	Polyhedra
fluid	40748	211880	211880	0	0	0	0
solid	7392	4131	0	612	0	3519	0
All Domains	48140	216011	211880	612	0	3519	0

Table 3. Mesh Statistics for CFX

Domain	Minimum Face Angle	Maximum Face Angle	Maximum Edge Length Ratio	Maximum Element Volume Ratio	Connectivity Range	
fluid	18.603 [degree]	121.853 [degree]	2.82446	11.7281	1	40
solid	38.7383 [degree]	134.867 [degree]	2.45813	2.86149	2	6
All Domains	18.603 [degree]	134.867 [degree]	2.82446	11.7281	1	40

3. Physics Report

Table 4. Domain Physics for CFX

Domain - fluid	
Type	Fluid
Location	B59
<i>Materials</i>	
Water	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	3.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Isothermal
Fluid Temperature	3.0000e+01 [C]
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable
Domain - solid	
Type	Solid
Location	B20
<i>Settings</i>	
Domain Motion	Rotating
Angular Velocity	2.5000e-01 [radian s ⁻¹]
Axis Definition	Coordinate Axis
Rotation Axis	Coord 0.1
Domain Interface - Default Fluid Solid Interface	
Boundary List1	Default Fluid Solid Interface Side 1
Boundary List2	Default Fluid Solid Interface Side 2
Interface Type	Fluid Solid
<i>Settings</i>	
Interface Models	General Connection
Mesh Connection	Automatic

Table 5. Boundary Physics for CFX

Domain	Boundaries	
fluid	Boundary - inlet	
	Type	INLET
	Location	F60.59
	<i>Settings</i>	
	Flow Regime	Subsonic

	Mass And Momentum	Normal Speed
	Normal Speed	5.0000e-01 [m s ⁻¹]
	Turbulence	Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
	Boundary - Default Fluid Solid Interface Side 1	
	Type	INTERFACE
	Location	F66.59, F67.59, F68.59, F69.59, F70.59, F71.59
	<i>Settings</i>	
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Roughness	Smooth Wall
	Boundary - outlet	
	Type	OUTLET
	Location	F63.59
	<i>Settings</i>	
	Flow Regime	Subsonic
	Mass And Momentum	Average Static Pressure
	Pressure Profile Blend	5.0000e-02
	Relative Pressure	2.0000e+04 [Pa]
	Pressure Averaging	Average Over Whole Outlet
	Boundary - wall	
	Type	WALL
	Location	F61.59, F62.59, F65.59
	<i>Settings</i>	
	Mass And Momentum	No Slip Wall
	Wall Roughness	Smooth Wall
	Boundary - wall1	
	Type	WALL
	Location	F64.59
	<i>Settings</i>	
	Mass And Momentum	Free Slip Wall
solid	Boundary - Default Fluid Solid Interface Side 2	
	Type	INTERFACE
	Location	F21.20, F22.20, F23.20, F24.20, F25.20, F26.20
	<i>Settings</i>	
	Heat Transfer	Adiabatic

4. Pictures

Figure 1. Iso View of Wireframe

BIODATA PENULIS



Ahmad Syahroni lahir di Probolinggo pada tanggal 28 September 1996. Penulis menjalani pendidikan formal SD selama 6 tahun di SDN Tongas Wetan 1 Probolinggo, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Probolinggo dan SMA Negeri 1 Probolinggo. Setelah lulus pada tahun 2015, penulis mengikuti Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN) dan diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan dan Badan Eksekutif Mahasiswa

Fakultas Teknologi Kelautan sebagai Staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa dan Kajian Strategis periode 2016 – 2017 dan diberikan amanah untuk menjadi Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HIMATEKLA Gradasi pada periode 2017 – 2018. Penulis juga aktif dalam dunia Latihan Keterampilan Manajerial Mahasiswa, mulai dari LKMM Tingkat Pra Dasar sampai LKMM Tingkat Menengah, penulis juga menjadi salah satu pemandu samudera di FTK ITS. Selain aktif di dalam dunia organisasi kemahasiswaan, penulis juga aktif menjadi asisten laboratorium mahasiswa di Laboratorium Perancangan dan Konstruksi Bangunan Laut dari tahun kedua sampai tahun keempat. Penulis juga diberi kesempatan untuk bisa Kerja Praktek di PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WMO) pada bulan Juni – Agustus 2018, penulis ditempatkan di Departemen Facility Engineering and Integrity (FEI) untuk beberapa proyek PHE WMO. Salah satunya adalah melakukan analisis penilaian resiko pada pipa bawah laut jalu CPP-ORF yang mengalami bentangan bebas dengan metode Kent Muhlbauer. Penulis juga diberikan kesempatan lebih untuk lulus dalam kurun waktu 3.5 tahun.

Narahubung :

Email : ahmad.syahroni37@gmail.com